

New Science

П. УОРД Д. КИРШВИНК

НОВАЯ ИСТОРИЯ

происхождения жизни
на Земле



Общепринятая история происхождения жизни на Земле устарела. Двое ученых, Питер Уорд и Джозеф Киршвинк, предлагают книгу, в которой собраны все выводы последних исследований. Авторы показывают, что многие наши прежние представления об истории происхождения жизни неверны. Во-первых, развитие жизни не было неторопливым, постепенным процессом: катаклизмы способствовали формированию жизни больше, чем все остальные силы вместе взятые. Во-вторых, основа жизни — углерод, но какие еще элементы определили ее эволюцию? В-третьих, со времен Дарвина мы мыслили в категориях эволюции видов. На самом деле имела место эволюция экосистем — от подводных вулканов до тропических лесов, — которые сформировали мир, каким мы его знаем. Опираясь на свой многолетний опыт в палеонтологии, биологии, химии, астробиологии, Уорд и Киршвинк рассказывают историю жизни на Земле, такую фантастическую, что ее трудно представить, и в то же время такую знакомую, что нельзя пройти мимо.

- [Питер Уорд](#)
 - [Предисловие](#)
 -
 - [Что такого нового в этой «Новой истории происхождения жизни»?](#)
 - [Чем мы занимаемся](#)
 - [Глава 1](#)
 -
 - [Как появилась шкала образца 2015 года?](#)
 - [Глава 2](#)
 -
 - [Что такое «землеподобная планета»?](#)
 - [Системы, необходимые для существования жизни, и их история](#)
 - [Круговорот веществ и мировые температуры](#)
 - [Показатели углекислого газа и кислорода в фанерозое](#)
 - [Глава 3](#)
 -
 - [Жизнь и смерть простейших организмов](#)
 - [Жизнь: определения понятия](#)
 - [Энергия и определение жизни](#)
 - [Неживые составляющие земного живого организма](#)
 - [Глава 4](#)
 -
 - [Пруд Дарвина](#)
 - [Минеральный состав поверхностей гидротермальных впадин](#)
 - [Метеоритные кратеры в пустынях](#)
 - [Панспермия и Марс](#)
 - [Возникновение жизни — представления 2014 года](#)
 - [Порог Дарвина](#)
 - [Глава 5](#)
 -

- [Жизнь в архее и путь к кислороду](#)
- [Некоторые соображения геологической науки и кислородная катастрофа](#)
- [Глава 6](#)
 -
 - [Странные первые многоклеточные](#)
 - [Любопытные организмы, известные как акритархи \(Acritarchs\)](#)
 - [Окончание скучного миллиардолетия](#)
- [Глава 7](#)
 -
 - [Жизнь и «снежки»](#)
 - [Жизнь в эдиакарский период](#)
 - [Мировая эдиакарская фауна](#)
 - [Сообщества вендской биоты](#)
 - [Эдиакарские микрокаменелости с шипами](#)
 - [В поисках «двусторонних»](#)
 - [Глина, жизнь на суше и создание среды, пригодной для существования животных](#)
- [Глава 8](#)
 -
 - [Физические и химические причины кембрийского взрыва](#)
 - [Стивен Гулд и Саймон Конвей Моррис: схема диспропорции](#)
 - [Новая датировка кембрийского взрыва](#)
 - [Неизвестные сюрпризы кембрийского взрыва](#)
 - [Окончание кембрия: SPICE и первое фанерозойское массовое вымирание](#)
- [Глава 9](#)
 -
 - [Кембрийский фундамент: развитие многообразия видов в ордовикском периоде](#)
 - [История об истории биоразнообразия](#)
 - [Динамика биоразнообразия](#)
 - [Ордовикское массовое вымирание](#)
- [Глава 10](#)
 -
 - [Распространение растений на суше](#)
 - [Суша и море](#)
 - [Первые сухопутные животные](#)
 - [Джон Лонг и рыбы формации Гого](#)
 - [Развитие сухопутных позвоночных](#)
- [Глава 11](#)
 -
 - [Каменноугольный и пермский периоды — время высоких уровней кислорода в атмосфере](#)
 - [Кислород и лесные пожары](#)
 - [Воздействие высокого уровня кислорода на растения](#)
 - [Кислород и развитие сухопутных животных](#)
 - [Кислород и температура, размножение и терморегуляция](#)
 - [Различия групп пресмыкающихся](#)
 - [Влияние уровней кислорода на размеры животных](#)

- [На заре эры млекопитающих](#)
- [Глава 12](#)
 -
 - [Результаты пермского массового вымирания](#)
 - [Столкновение или парниковый эффект?](#)
 - [Гипотеза Кампа и начало теории парникового вымирания](#)
 - [Влияние высоты обитания на развитие и распространение видов](#)
 - [Еще один аспект пермского массового вымирания](#)
- [Глава 13](#)
 -
 - [Триас — общая картина](#)
 - [Триасово-юрское вымирание](#)
 - [Цвета триасового периода](#)
- [Глава 14](#)
 -
 - [Динозавры](#)
 - [Почему появились динозавры?](#)
 - [Система воздушных мешков у птиц](#)
 - [Легкие динозавров и эволюция птиц](#)
 - [Птицеподобные рептилии и рептилиеобразные птицы](#)
 - [Размножение динозавров и кислород](#)
 - [«Идеальный» уровень кислорода](#)
- [Глава 15](#)
 -
 - [Мезозойская морская революция](#)
- [Глава 16](#)
 -
 - [Космическое воздействие и массовые вымирания](#)
 - [Летопись мел-палеогенового вымирания](#)
 - [Просто столкновение?](#)
 - [А что же базальт?](#)
- [Глава 17](#)
 -
 - [Жизнь на суше в палеоцене](#)
 - [Позднепалеоценовый термический максимум](#)
 - [Пастбища и млекопитающие постепенно охлаждающего кайнозойского мира](#)
- [Глава 18](#)
 -
 - [Великое разнообразие птиц](#)
- [Глава 19](#)
 -
 - [На пути к десятому вымиранию](#)
 - [Последний ледниковый период](#)
 - [Расселение человека по земному шару](#)
- [Глава 20](#)
 -
 - [Будущая эволюция человека](#)

- [Конец истории](#)
- [Заключительное слово](#)

- [notes](#)

- [1](#)
- [2](#)
- [3](#)
- [4](#)
- [5](#)
- [6](#)
- [7](#)
- [8](#)
- [9](#)
- [10](#)
- [11](#)
- [12](#)
- [13](#)
- [14](#)
- [15](#)
- [16](#)
- [17](#)
- [18](#)
- [19](#)
- [20](#)
- [21](#)
- [22](#)
- [23](#)
- [24](#)
- [25](#)
- [26](#)
- [27](#)
- [28](#)
- [29](#)
- [30](#)
- [31](#)
- [32](#)
- [33](#)
- [34](#)
- [35](#)
- [36](#)
- [37](#)
- [38](#)
- [39](#)
- [40](#)
- [41](#)
- [42](#)
- [43](#)
- [44](#)

- [45](#)
- [46](#)
- [47](#)
- [48](#)
- [49](#)
- [50](#)
- [51](#)
- [52](#)
- [53](#)
- [54](#)
- [55](#)
- [56](#)
- [57](#)
- [58](#)
- [59](#)
- [60](#)
- [61](#)
- [62](#)
- [63](#)
- [64](#)
- [65](#)
- [66](#)
- [67](#)
- [68](#)
- [69](#)
- [70](#)
- [71](#)
- [72](#)
- [73](#)
- [74](#)
- [75](#)
- [76](#)
- [77](#)
- [78](#)
- [79](#)
- [80](#)
- [81](#)
- [82](#)
- [83](#)
- [84](#)
- [85](#)
- [86](#)
- [87](#)
- [88](#)
- [89](#)
- [90](#)
- [91](#)

- [92](#)
- [93](#)
- [94](#)
- [95](#)
- [96](#)
- [97](#)
- [98](#)
- [99](#)
- [100](#)
- [101](#)
- [102](#)
- [103](#)
- [104](#)
- [105](#)
- [106](#)
- [107](#)
- [108](#)
- [109](#)
- [110](#)
- [111](#)
- [112](#)
- [113](#)
- [114](#)
- [115](#)
- [116](#)
- [117](#)
- [118](#)
- [119](#)
- [120](#)
- [121](#)
- [122](#)
- [123](#)
- [124](#)
- [125](#)
- [126](#)
- [127](#)
- [128](#)
- [129](#)
- [130](#)
- [131](#)
- [132](#)
- [133](#)
- [134](#)
- [135](#)
- [136](#)
- [137](#)
- [138](#)

- [139](#)
- [140](#)
- [141](#)
- [142](#)
- [143](#)
- [144](#)
- [145](#)
- [146](#)
- [147](#)
- [148](#)
- [149](#)
- [150](#)
- [151](#)
- [152](#)
- [153](#)
- [154](#)
- [155](#)
- [156](#)
- [157](#)
- [158](#)
- [159](#)
- [160](#)
- [161](#)
- [162](#)
- [163](#)
- [164](#)
- [165](#)
- [166](#)
- [167](#)
- [168](#)
- [169](#)
- [170](#)
- [171](#)
- [172](#)
- [173](#)
- [174](#)
- [175](#)
- [176](#)
- [177](#)
- [178](#)
- [179](#)
- [180](#)
- [181](#)
- [182](#)
- [183](#)
- [184](#)
- [185](#)

- [186](#)
- [187](#)
- [188](#)
- [189](#)
- [190](#)
- [191](#)
- [192](#)
- [193](#)
- [194](#)
- [195](#)
- [196](#)
- [197](#)
- [198](#)
- [199](#)
- [200](#)
- [201](#)
- [202](#)
- [203](#)
- [204](#)
- [205](#)
- [206](#)
- [207](#)
- [208](#)
- [209](#)
- [210](#)
- [211](#)
- [212](#)
- [213](#)
- [214](#)
- [215](#)
- [216](#)
- [217](#)
- [218](#)
- [219](#)
- [220](#)
- [221](#)
- [222](#)
- [223](#)
- [224](#)
- [225](#)
- [226](#)
- [227](#)
- [228](#)
- [229](#)
- [230](#)
- [231](#)
- [232](#)

- [233](#)
 - [234](#)
 - [235](#)
 - [236](#)
 - [237](#)
 - [238](#)
 - [239](#)
 - [240](#)
 - [241](#)
 - [242](#)
 - [243](#)
 - [244](#)
 - [245](#)
 - [246](#)
 - [247](#)
 - [248](#)
 - [249](#)
 - [250](#)
 - [251](#)
 - [252](#)
 - [253](#)
-

Питер Уорд

Джозеф Киршвинк

Новая история жизни на Земле

Предисловие

История почти в любом виде — возможно, самый нелюбимый школьный предмет. Одно из наиболее глубоких исследований на эту тему — в книге Джеймса Лёвена *Lies My Teacher Told Me: Everything Your American History Textbook Got Wrong* («Мой учитель мне соврал: все неправильности учебника по американской истории»^[1]), и ее основной вывод можно сформулировать всего в двух словах: бесполезная вещь! Лёвен пишет: «История, рассказанная в учебниках, предсказуема, любая проблема в них либо уже решена, либо вот-вот будет решена... Авторы не используют примеры настоящего, чтобы объяснить прошлое, ибо настоящее не является источником информации для авторов учебников по истории».

Мысль Лёвена вполне ясна. В той форме, в какой американскую историю преподают в старшей школе, прошлое и настоящее не связаны друг с другом, и получается, что история не имеет никакого отношения к современности, никоим образом не влияет на нее. И все же вывод Лёвена не совсем верен, особенно если говорить об истории развития жизни на Земле, древность которой записана на камнях, в молекулах и цепочках ДНК, присутствующих в любой нашей клетке. Польза изучения этой истории бесспорна, как и то, что знание истории Жизни может уберечь нас от почти полного вымирания.

В начале 1960-х годов великий американский писатель Джеймс Болдуин заметил: «Людям никуда не деться от истории, как и истории никуда не деться от людей»^[2]. Он имел в виду человечество, однако эти слова будут столь же верны, если заменить слово «люди» на «вся жизнь на Земле, в прошлом и настоящем», поскольку каждая цепочка ДНК в каждой клетке человеческого организма есть древняя запись биологической истории, сделанная простым кодом и передаваемая из поколения в поколение. Можно сказать, что ДНК *и есть не что иное, как история*, воплощенная в физической форме. Форма эта медленно создается и развивается в течение многих эпох с помощью самого беспощадного из всех создателей — естественного отбора. ДНК — история, живущая в нас, при этом она диктует нам свои условия. Это модель нашего тела, которая решает, что мы передадим нашим детям — дары во благо или мину замедленного действия. Нам и в самом деле никуда не деться от этого своеобразного носителя истории, которому никуда не деться от нас.

История развития жизни дает ответы на многие непростые, но такие актуальные вопросы, которыми задается каждый из нас: как нам, людям, удалось стать маленькой, только-только распутившейся веточкой на огромном дереве жизни? Какая борьба ожидает наш вид в будущем, какие невзгоды оставляют свои следы на нашей, человеческой, ветви этого старого дерева, которому четыре миллиарда лет? Прошлое помогает понять, какое место мы занимаем среди более двадцати миллионов ныне живущих видов, а также несметного числа других, которые уже исчезли. Исчезновение любого вида означает исчезновение и будущей вероятной эволюционной истории еще неназванных видов.

На страницах этой книги мы пройдем долгий путь к нашему будущему, переживем давние испытания, с которыми пришлось столкнуться нашим предкам: огонь, лед, удары молнии, ядовитый газ, клыки хищников, беспощадную конкуренцию, смертельные дозы радиации, голод, многочисленные изменения условий среды обитания, а также войны и завоевания в борьбе за освоение каждого пригодного к жизни уголка этой планеты. И каждый эпизод стал слагаемым всей суммы информации в существующей сегодня ДНК. Каждый кризис или война изменяли геномы, добавляя или расщепляя различные гены. Каждый из нас — потомок выживших в катастрофах и закаленных временем людей.

Есть еще одна, и даже более весомая, причина заниматься изучением истории

возникновения жизни, ее назвал Норман Казинс: «История — это огромная система раннего оповещения»^[3]. Эта мудрая мысль была высказана в разгар холодной войны. Более поздние поколения слабо представляют себе, что значило расти в 1950–1960-е годы, когда еженедельно сирена оповещения гражданского населения напоминала нам, детям, что любой слабый звук реактивного самолета может быть началом конца.

Войны без конца взимают зловещую дань с человечества — физическую, экономическую, эмоциональную. История развития жизни имеет много общих черт с историей человеческих конфликтов. Эволюция средств нападения у хищников (более сильные когти и клыки, резкие запахи, даже ядовитые шипы и жала, чтобы ловить и убивать другие виды) инициирует развитие элементов сопротивления у потенциальных жертв (более надежная защита тела — панцирь, более высокая скорость передвижения, развитие способности прятаться), а иногда — и возникновение защитного оружия. Все это можно назвать «биологической гонкой вооружений». Многие знаменательные события эволюции не могут повторяться, поскольку у эволюции слишком большие сроки периодов развития, рассчитанные на то, чтобы наполнить биосферу конкурентоспособными и хорошо приспособленными организмами. Например, вряд ли возможно повторение Кембрийского взрыва, в результате которого возникло множество основных форм животного мира. Но что *действительно* может повторяться, так это явления, противопоставленные жизни и разнообразию, например, вымирание, или даже массовое вымирание, как это происходило в прошлом из-за катастрофических событий.

Каждой молекулой углекислого газа, попадающей в атмосферу, мы игнорируем сигналы системы раннего оповещения, которые напоминают нам, что в прошлом увеличение углекислоты в воздухе уже привело к десяти случаям массового вымирания видов и что сейчас ситуация похожая. Причинами тех случаев вымирания стали не астероиды, а быстрое насыщение атмосферы углекислым газом в результате вулканической активности и парниковый эффект, который сопутствовал ей.

В нынешнем веке наблюдается та же ситуация, что и в прошлых веках, ее назвали «парниковое массовое вымирание» — по аналогии со случаями массового вымирания, уже имевшими место в истории Земли^[4]. Благодаря анализу окаменелостей, в том числе с помощью современных устройств и инструментов, мы понимаем, что опасность такого вымирания реальна и сегодня. Несмотря на это, многие наши коллеги остаются глухи или предпочитают не слышать крики умирающих не только из прошлого, но и *из будущего*. История развития жизни предоставила нам систему, которая предупреждает нас, что мы *обязаны* сократить выбросы углекислого газа в атмосферу. Однако *человеческая* история показывает, что люди, скорее всего, не обратят внимания на предупреждения, пока изменения климата не обернутся массовыми человеческими жертвами.

Научная информация о далеком прошлом — один из аспектов, который чаще всего игнорируется при обсуждении климатических изменений. Одно из наиболее часто (настолько часто, что его уже немного затерли) цитируемых высказываний об истории принадлежит Джорджу Сантаяне: «Те, кто игнорирует историю, обречены повторять ее ошибки»^[5]. Памятуя о хорошо известных в истории случаях массового вымирания по причине быстрого увеличения углекислоты в атмосфере, нам следует особенно внимательно отнестись к слову «обречены» в высказывании Джорджа Сантаяны.

Что такого нового в этой «Новой истории происхождения жизни»?

Ни одна книга не может в полной мере воссоздать историю развития жизни. Приходится делать выбор, и наш выбор был продиктован словом «новая». Последняя «полная» однотомная версия подобной истории вышла в середине 1990-х — удивительный бестселлер *Life: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* («Жизнь: естественная история первых четырех миллиардов лет жизни на Земле»^[6]), автор — британский палеонтолог и писатель Ричард Форти. Его произведение восхитительно, и по сей день его приятно читать, а в нашем случае — перечитывать, и это — спустя 20 лет с момента публикации! Но наука развивается очень быстро, сегодня мы уже знаем то, что не было известно два десятилетия назад. Развиваются даже целых два научных направления, которые только зарождались в 1990-е годы: астробиология и геобиология. Развитие технологий позволило извлечь совершенно новые образцы из окаменелостей и горных пород, а также выявить прежде неизвестные таксоны. Изменились даже принципы научных исследований, и теперь самые значительные открытия делаются на стыке некогда самодостаточных и хорошо известных наук: геологии, астрономии, палеонтологии, химии, генетики, физики, зоологии и ботаники — каждая наука символически обретается в университетах в своем отдельном здании, имеет не только свой собственный факультет, но и свой терминологический аппарат и комплекс методов, позволяющих получать новую информацию.

В своем изложении материала мы исходили из трех принципов, которые послужили основой именно для *нашей* новой истории происхождения жизни. Во-первых, мы считаем, что история развития жизни в большей степени зависит от катастрофических событий, чем от совокупности всех прочих сил, включая медленную, постепенную эволюцию, какой ее впервые описал Чарльз Дарвин, а он в свою очередь опирался на принципы основателей актуализма. Актуализм, главный принцип геологии на протяжении более двух веков, изначально был разработан Джеймсом Хаттоном и Чарльзом Лайелем в конце XVIII века^[7]. Этот принцип изучали многие поколения молодых естествоиспытателей, в том числе и Дарвин^[8]. Открытие погубившего динозавров астероида, который врезался в нашу планету 65 млн лет назад, стало переломным моментом в изучении геологии. Взгляды исследователей сместились в сторону подхода, который назвали «неокатастрофизм»^[9], отчасти возрождая представления катастрофизма — направления, существовавшего до актуализма.

Мы покажем на страницах этой книги, что актуализм — то, как он объясняет древний мир, вид и темпы эволюции — не актуален и по большому счету может быть опровергнут. Происходящее в современности не дает понимания того, что происходило в далеком прошлом, тем более что те события являлись скорее катаклизмами, а не результатом постепенного развития ситуации. Например, какие современные события помогли бы объяснить такие явления, как «Земля-снежок», или Кислородная катастрофа, или насыщенный серой Океан Кэнфилда^[10], возникшие более миллиарда лет назад и способствовавшие эволюции первой ступени развития животных. Массовое вымирание динозавров на границе мелового и палеогенового периодов (так называемое мел-палеогеновое вымирание, или мел-третичное вымирание) также не имеет аналогий в наши дни, не существует сегодня и того типа океана и атмосферы, которые создали возможности для зарождения жизни на планете, как нет и того насыщения атмосферы углекислым газом, которое не позволило бы появиться ни одному островку льда на Земле. Настоящее не является ключом к пониманию большей

части событий прошлого. Думая иначе, мы ограничиваем себя во взглядах и понимании природы вещей.

Во-вторых, коль скоро мы являемся углеродной формой жизни, формируемой цепочками углеродных соединений (атомы углерода, соединяясь, создают белки), то логично полагать, что на историю жизни имели особое влияние молекулы трех газов: кислорода, углекислого газа и сероводорода. Возможно, из всех элементов именно сера имела наибольшее влияние на развитие природы и жизни на нашей планете.

Наконец, раз история развития жизни есть история живых существ, то именно эволюция экосистем является самым значимым фактором для становления совокупностей современной картины жизни. Коралловые рифы, тропические леса, глубоководная фауна разломов и многие другие — каждое из этих явлений может быть особой пьесой со своими актерами, но с тем же сценарием из эпохи в эпоху. В то же время мы знаем, что в глубине времен случайно возникали принципиально новые экосистемы, населенные новыми формами живых организмов. Появление живых существ, которые, например, могут летать, или плавать, или ходить на двух ногах — все это крупные сдвиги эволюции, которые изменили весь мир, и каждый из них помог создать новые экосистемы.

В любой книге по истории находит отражение опыт, накопленный ее автором, его размышления и умозаключения. Питер Уорд с 1973 года занимается палеобиологией, опубликовал множество работ о современных и древних головоногих, а также о массовом вымирании позвоночных и беспозвоночных. Джозеф Киршвинк — геолог-биолог, начал свои исследования с изучения переходного периода от докембрия к кембрию, но в дальнейшем расширил границы своих интересов как в направлении более древних периодов (Кислородная катастрофа), так и в сторону более поздних — именно он является первооткрывателем «Земли-снежка», очень большой части истории жизни. Позднее уже вместе мы работали над темами вымирания в девонском, пермском, триасовом, юрском периодах, а также над темой мел-палеогенового вымирания.

Наша совместная работа началась в середине 1990-х годов. Мы побывали с экспедициями в Южной Африке с целью исследования массового пермского вымирания, а с 1997-го по 2001-й — в Баха-Калифорния и в районе острова Ванкувер для изучения аммонитов мелового периода. Мы проводили исследования массового вымирания триасового, юрского периодов на островах Королевы Шарлотты, мел-палеогенового вымирания — в Тунисе, на острове Ванкувер, в Калифорнии, Мексике и Антарктиде, а девонского массового вымирания — в Западной Австралии.

Мы старались «исполнить» книгу гармоничным дуэтом, однако в некоторых главах то один, то другой из нас берет верх в силу своей приверженности тем или иным научным интересам или потому что более осведомлен в определенной научной сфере.

Ранее мы упоминали, что живых видов на Земле — миллионы. Большинство тех, кто занимается исследованиями живой природы, согласятся, что текущее число формально определенных видов (то есть которые имеют двойное название — для рода и для вида), вероятно, не превышает 10 % от общего числа всех живущих в настоящее время на планете видов^[11]. Но сколько же их было в прошлом? Наверняка миллиарды. И это делает написание истории их возникновения и развития весьма трудоемким делом. Палеонтология, биология и геология имеют большой запас довольно специфичных слов для описания своих предметов изучения, и наша задача — сделать все эти замысловатые слова более-менее понятными для читателей или, как говорят в NASA, расшифровать бесконечные сокращения. Возможно, еще более утомительно то, что мы вынуждены использовать множество латинских названий для животных, больших и малых, когда-либо существовавших на Земле и тех, которые все еще живут на нашей планете.

В сссылках читатель найдет множество имен тех наших коллег, которых мы имеем честь цитировать. Однако Питер Уорд настаивает на том, чтобы особым образом отметить двух исследователей, чьи работы оказались неопенимым источником знаний для написания данной книги, — Роберта Бернера и Ника Лэйна^[12].

Глава 1

О времени

До недавнего времени история развития жизни располагала довольно мудреной шкалой времени и измерялась не годами, а относительным положением осадочных пород, расположенных в земной коре. В этой главе мы рассмотрим геологическую временную шкалу — инструмент, который используют для изучения относительной последовательности периодов истории происхождения жизни на Земле.

Геологическая, или геохронологическая, шкала — шаткое древнее сооружение, созданное на основе разных правил и течений европейского формализма в XIX веке. Более поздние поколения геологов не любят это приевшееся нагромождение условностей, объединенное в шкалу, которое, однако, все еще востребовано среди быстро стареющих представителей прежних геологических школ. И даже сегодня любое изменение в этой шкале должно быть одобрено разнообразными комитетами^[13], все временные объединения должны быть связаны с типическим сегментом — существующим материалом осадочных пород, который был выбран в качестве лучшего представителя соответствующего временного интервала. Предполагается, что типический сегмент не закрыт другими породами и не поврежден тектоническими изменениями, тепловым воздействием и «структурными» включениями (инородные включения, складки породы и прочие замысловатые странности того, что когда-то было полностью горизонтальным осадочным слоем). Сегмент отложений не должен быть перевернутым с ног на голову (что случается намного чаще, чем можно было бы предположить), должен иметь множественные фоссилии (и большие, и микроскопические), а также должен иметь слои, ископаемые отпечатки или минеральные включения, которые могут быть датированы в «абсолютных» цифрах (то есть в годах) посредством комбинации радиометрического метода, магнитостратиграфии и какого-либо изотопного метода определения возраста (например, углеродного или стронций-изотопного стратиграфического метода).

Существующая шкала сложна и часто бесполезна, то есть когда мы говорим, что какая-то окаменелость относится к юрскому периоду, то имеется в виду, что эта порода — того же возраста, что и определенный юрский типический сегмент, который находится в Юрских горах Европы. Но это и есть то, с чем нам, историкам развития жизни и планеты, приходится работать, когда нужно определить возраст породы по отпечаткам на ней, а также передать наши знания об этом возрасте всем остальным. Есть способы датировки более современные, чем определение возраста событий и животных по их относительному положению в слоях залегания^[14], включая определение реального возраста ископаемого изотопными методами (например, хорошо известный метод «углерод-14» или другие радиометрические способы с использованием известных периодов распада элементов, содержащихся в породе). Но на самом деле ископаемых окаменелостей в слоях пород очень мало или они не поддаются «абсолютной» датировке. Чаще всего в наличии есть только сама окаменелость, и все.

Геохронологическая шкала остается не только единственным инструментом датировки всех пород на Земле, причем с учетом их возраста, а не структурных качеств, но и средством датирования событий в истории развития жизни. Геохронологическая шкала является тщательно разработанной в XIX веке системой, но ее сложные названия, неравные и на первый взгляд непохожие друг на друга временные интервалы чаще мешают, чем помогают работать. Тут дело не в принципах, на которых она была основана, а в бюрократической

формализации, придавшей ей современный вид. Только в последнее десятилетие были предложены варианты новых «периодов». Формулирование этих двух периодов и их использование являются центральным звеном нашего нового понимания истории развития жизни: криогений (800–600 млн лет назад) и следующий сразу за ним эдиакарий (610–542 млн лет назад).

Как появилась шкала образца 2015 года?

Первая половина XVIII века ознаменовалась зарождением геологии как научного направления, а также были сделаны первые шаги к созданию геохронологической шкалы, которая приобрела свой современный вид уже позднее. В течение этого времени были обозначены различные эры, эпохи и периоды, которые пришли на смену старой системе^[15]. До 1800 года считалось, что каждая порода на Земле относится к своему специфическому времени. Магматические и метаморфические породы, сердцевина любой горы и вулкана, представлялись самыми древними земными породами. Осадочные породы как результаты череды мировых наводнений считались более молодыми. Этот принцип, названный нептунизмом, развился наконец до состояния, когда стали считать, что различные осадочные породы имеют различный возраст. Виды белого мела, которые можно найти повсюду вплоть до северных пределов Европы, а также в Азии, относились к одному возрасту, отличному от песчаников и тем более — от глинистых сланцев. Но в 1805 году было сделано открытие, которое изменило все: английский геолог Уильям Смит^[16] впервые указал на то, что существует некая последовательность ископаемых окаменелостей, но не по их литологической структуре, а по положению в самих породах. Он доказал, что различные породы могут относиться к различным временным периодам, но одна и та же последовательность типов окаменелостей может быть обнаружена в различных, и притом далеких друг от друга, регионах.

Результатом работы Уильяма Смита стал принцип фауновой последовательности, который дал возможность создать геохронологическую шкалу в ее современном виде^[17]. Ключом к этому созданию стала жизнь, жизнь, сохраненная в окаменелостях, а относительная разница в содержании окаменелостей позволила разграничить последовательности пород, находящихся на поверхности Земли. В самый крупный подраздел вошли более древние породы без ископаемых окаменелостей — породы, которые находились под теми, в которых окаменелости встречались. Самый древний слой, который содержал ископаемые окаменелости, был назван кембрием, или кембрийским периодом, в честь уэльского племени, и, таким образом, все породы, которые были старше этого периода, получили название докембрийских. Породы, содержащие ископаемые останки, включая кембрий и после него, получили название «фанерозой», или «фанерозойский эон». Протерозой — эон, который последним предшествовал появлению большого количества живых организмов, — пришел на смену архею, а перед ним — катархею.

Очень быстро получили свои названия также эры и периоды фанерозоя. За несколько десятилетий добросовестного научного поиска, анализа и учета ископаемых останков (были сведены вместе и сопоставлены первые и последние по времени образования ископаемые образцы в напластованиях) стало понятно, что фанерозой можно разделить на три крупных временных отрезка — по признаку накопленных ископаемых. Самый древний был назван палеозоем (*греч.* «древняя жизнь»), средний — мезозоем, а последний — кайнозоем.

Многие наименования геологических периодов, которые мы используем и по сей день, существовали еще до появления названий эр и эонов. Вот они (в порядке уменьшения геологического возраста): кембрий, ордовик, силур, девон, каменноугольный (это европейское название, в североамериканской геологической науке принято подразделять этот период еще на миссисипский и пенсильванский) и пермский периоды образуют палеозой; триас, юра и мел образуют мезозой; палеоген и неоген (раньше назывались третичный период), а также четвертичный период образуют кайнозой.

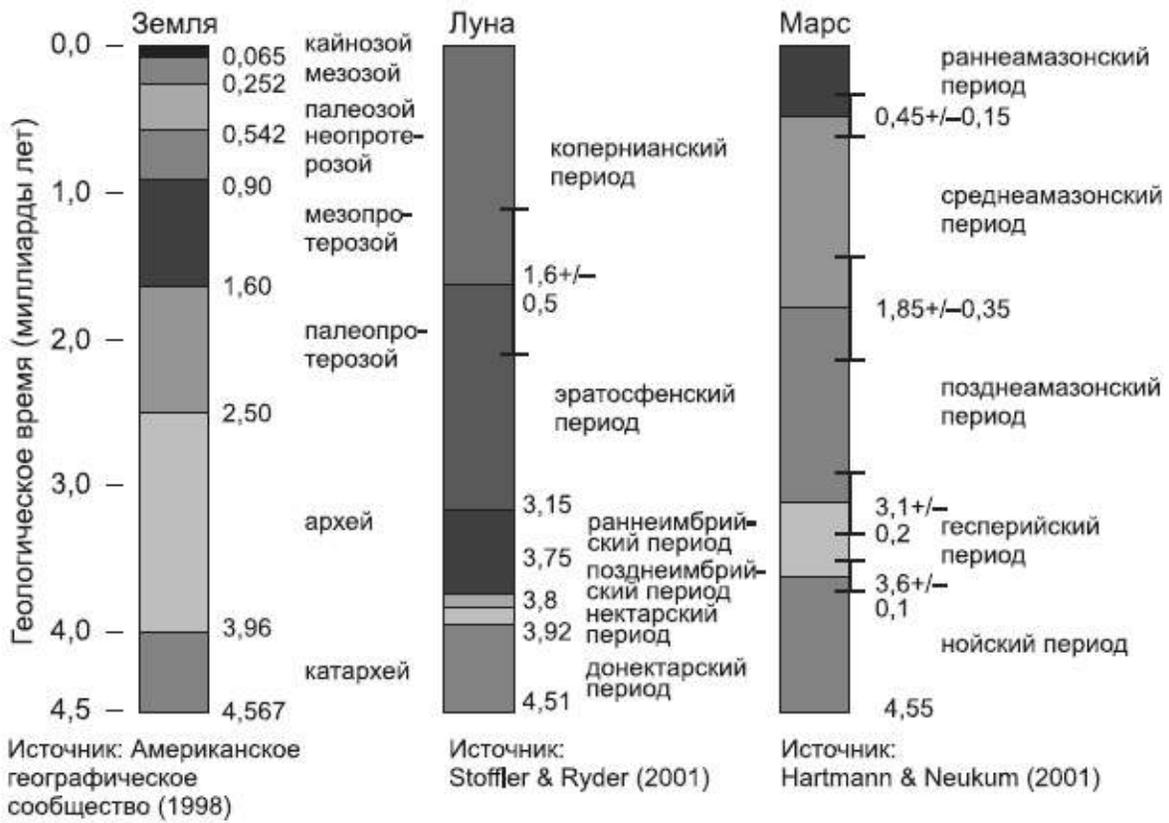
		Эра	Период	Млн л. н.			Эра	Период	Млн л. н.
Фанерозойский эон	Кайнозой		Неогеновый	0	Докембрийский эон			Эдиакарий	542
			Палеогеновый	23			Неопротерозойский	Криогений	635
	Мезозой		Меловой	66					Тоний
		Юрский		145			Мезопротерозойский	Стений	1000
				200				Эктазий	1200
				252				Калимий	1400
	Палеозой		Триасовый	299			Палеопротерозойский	Статерий	1600
		Пермский		359				Орозирий	1800
				416				Риасий	2050
		Каменно-угольный		444			Сидерий	2300	
			Девонский				488		2500
							542	Неоархей	
	Силурийский		635	Архей				2800	
			635				Мезоархей		
Ордовикский		635			3200				
		635	Палеоархей		3600				
Кембрийский		635	Эоархей		не определено				
	Неопротерозой	Эдиакарий	635	Катархей	4567				

Геологическая временная шкала — современный формат (дополненная по «Новой геологической временной шкале» Феликса Градштейна — Felix M. Gradstein et al. «A New Geologic Time Scale, with Special Reference to Precambrian and Neogene,» Episode 27, no. 2, 2004: 83–100).

К 1850 году все периоды оказались на своих местах, и новые подразделения вводились очень редко, хотя многие геологи XIX века и предпринимали амбициозные попытки обозначить целый новый период, что в те времена означало не более чем смену старых наименований. Только одна такая попытка по-настоящему удалась, и принадлежала она английскому ученому Чарльзу Лэпворту^[18], который выделил ордовикский период, доказав, что некоторые верхние слои кембрия и нижние слои силура заслуживают объединения в отдельный слой и период. Лэпворт смог убедить в своей правоте коллег-ученых, и в 1879 году появился новый период. К тому времени двое первооткрывателей геологических названий: Адам Седжвик (кембрий) и Родерик Мерчисон (силур и пермь) умерли, и Лэпворт занял освободившийся трон. Все они были весьма тщеславны и яростно сражались за «свои» периоды.

Самым большим изменением геохронологической шкалы, которое повлияло на понимание истории развития жизни, было добавление криогения^[19] и эдиакария^[20] в протерозойский эон — период, когда жизнь готовилась к мощному скачку в развитии животного мира. Однако задолго до быстрого развития эволюции не только многоклеточных животных, но и жизни как таковой. Земля должна была стать планетой, способной поддерживать существование жизни.

Межпланетная протяженная геологического времени



Глава 2

Как Земля стала Землей:

4,6–4,5 миллиарда лет назад

Мы теперь уже не верим в то, что Земля — центр мироздания, центр Солнечной системы, единственное место во Вселенной, где есть жизнь и разумные существа, подобные Богу-творцу, как верили в это многие, даже самые просвещенные, умы Возрождения. Сейчас нам известно, что Земля — одна из многих подобных ей планет, и жизнь также может оказаться совершенно заурядным явлением. Самыми недавними подтверждениями этому являются исследования землеподобных планет, или ЗПП^[21].

С 1990-х годов к настоящему моменту произошли два важных изменения, совершенно особенных и перестроивших всю систему знаний об истории жизни на планете. Во-первых, до недавнего времени геологи и палеонтологи почти не обращали внимания на тот факт, что наша планета — *лишь одна из многих планет*. А во-вторых, в соответствии с этим первым «модным» представлением, внимание не уделялось и тому, что жизнь также может быть не уникальна, а иметь аналоги в необъятном космосе. Открытие планет, вращающихся вокруг других звезд, полностью изменило такой порядок вещей как для науки, так и для всего человеческого общества^[22]. Поменялись исследовательские приоритеты, и сейчас научный интерес, помимо Земли, направлен и на другие планеты, которые назвали экзопланетами. Перемены в научных взглядах затронули не только астрономию и специализированные отрасли геологии, но и биологию, и даже религию. Джефф Марси, один из первых исследователей экзопланет, вспоминает, что среди множества телефонных звонков, которые на него посыпались после тех памятных открытий, одним из первых был звонок из Ватикана. Католическая церковь, искушенная в астрономии, хотела знать, может ли существовать жизнь на недавно открытой планете и какие последствия для религии это будет иметь.

Самая первая экзопланета была обнаружена в 1992 году (вращается вокруг звезды-пульсара)^[23], затем — в 1995 году — обнаружили планету, которая вращается вокруг звезды главной последовательности, то есть такой, которая скорее будет способствовать возникновению и поддержанию жизни, чем пульсары, поскольку у последних есть дурная привычка выбрасывать на соседние планеты большие потоки уничтожающей жизнь энергии. А всего лишь год спустя после обнаружения этой второй планеты было сделано еще одно астрономическое открытие, подстегнувшее дискуссии в науке, а также в политике и обществе: из NASA сообщили о метеорите с Марса^[24], на котором нашли возможные признаки жизни (а может, и ископаемые останки микробов). Последовательность этих открытий положила начало новому научному направлению — астробиологии.

На исследования в области истории развития жизни были выделены огромные суммы, в том числе на изучение таких проблем, которые раньше очень скудно финансировались, например, происхождение и природа первой жизни на Земле. Все это произошло в конце 1990-х, и к началу нового века названные отрасли науки стали одними из самых быстро развивающихся. События эти трансформировали науку в целом и продолжают оказывать влияние на историю развития жизни на Земле, тему данной книги и на наше представление о возможной жизни на других планетах и об истории этой «другой» жизни.

Итак, то, что наша планета — лишь одна из многих возможно обитаемых, и что жизнь есть лишь один из возможных результатов химического процесса — все это на сегодня

является известной всем данностью [\[25\]](#).

Что такое «землеподобная планета»?

Вероятно, это такой земной шовинизм, но вероятно также и то, что во Вселенной возможна только жизнь, подобная земной. Так или иначе, но приоритетом в исследованиях экзопланет является обнаружение планет, похожих на нашу. Возникает вопрос: а что такое планета, подобная Земле?

Есть множество определений. В самых обстоятельных указано, что такие планеты имеют скальную поверхность (не ледовую) и очень плотное ядро. В наиболее исчерпывающем варианте определения отмечается, что планета должна иметь необходимые условия для жизни, «какой мы ее знаем», включая умеренные температуры и атмосферу, которые бы позволяли образовываться жидкой воде на планетарной поверхности. Понятие «землеподобная» часто используется для обозначения планеты, похожей на нашу в ее современном состоянии, однако мы же знаем, что Земля очень изменилась за последние 4,567 млрд лет — с момента возникновения. В разные периоды своего бытия *наша* «землеподобная» планета не могла иметь вообще никакой жизни, и на протяжении более чем половины ее истории усложненная жизнь, вроде многоклеточных животных и высших растений, существовать не могла.

Влага же, скорее всего, была на Земле почти всегда. За 100 млн лет формирования Луны, когда в еще только образующуюся Землю врезалось небесное тело, похожее на Марс, на нашей планете точно была жидкая вода. В крошечных песчинках были найдены остатки циркона^[26], возраст которого с помощью радиометрии датируется 4,4 млрд лет. В них есть изотопные признаки океанической воды, которую впитала мантия Земли в процессе плитотектонической активности. Хотя Солнце на ранних этапах земной истории было не таким активным, тем не менее присутствовало много газов, которые создавали парниковый эффект и согревали поверхность планеты. Еще более важной была вулканическая деятельность молодой Земли — в десятки раз более мощная, чем солнечная активность, и поэтому пары, вырывающиеся из недр, согревали и океан, и сушу. Некоторые астробиологи считают, что жизнь не могла возникнуть на планете, пока та сильно не остыла за первый миллиард лет своей истории, а это является причиной полагать, что жизнь, возможно, зародилась на другой планете, такой как Марс. Но есть еще одна землеподобная планета в Солнечной системе — Венера.

Раньше Венера, скорее всего, находилась в обитаемом поясе Солнечной системы^[27], хотя теперь температура ее поверхности равна около +500 °C из-за парникового эффекта, который, вероятно, уничтожил все живое на поверхности (некоторые думают, что в атмосфере Венеры возможно существование живых микробов, хотя мы считаем, что вряд ли). Геологические пласты Марса однозначно свидетельствуют о наличии в какой-то из периодов его истории жидкой воды, даже рек и ручьев, которые могли обкатывать камни и образовывать веерообразные дельты^[28]. Сегодня вода на Марсе исчезла либо существует в виде льда или редкого пара в атмосфере, почти равной вакууму. Предположительно, меньшая масса Марса не позволила развиваться плитотектоническим процессам, необходимым для перемещения планетарной коры, это ослабило температуру в его ядре, состоящем из металлов, что привело к невозможности сформировать магнитное поле, способное удерживать атмосферу, и из-за большей удаленности от Солнца. Красная планета легко превратилась в постоянную «планету-снежок». Если на Марсе и существовала когда-то жизнь, то теперь она сохранилась только под поверхностью, поддерживаемая слабой геохимической активностью радиоактивного распада.

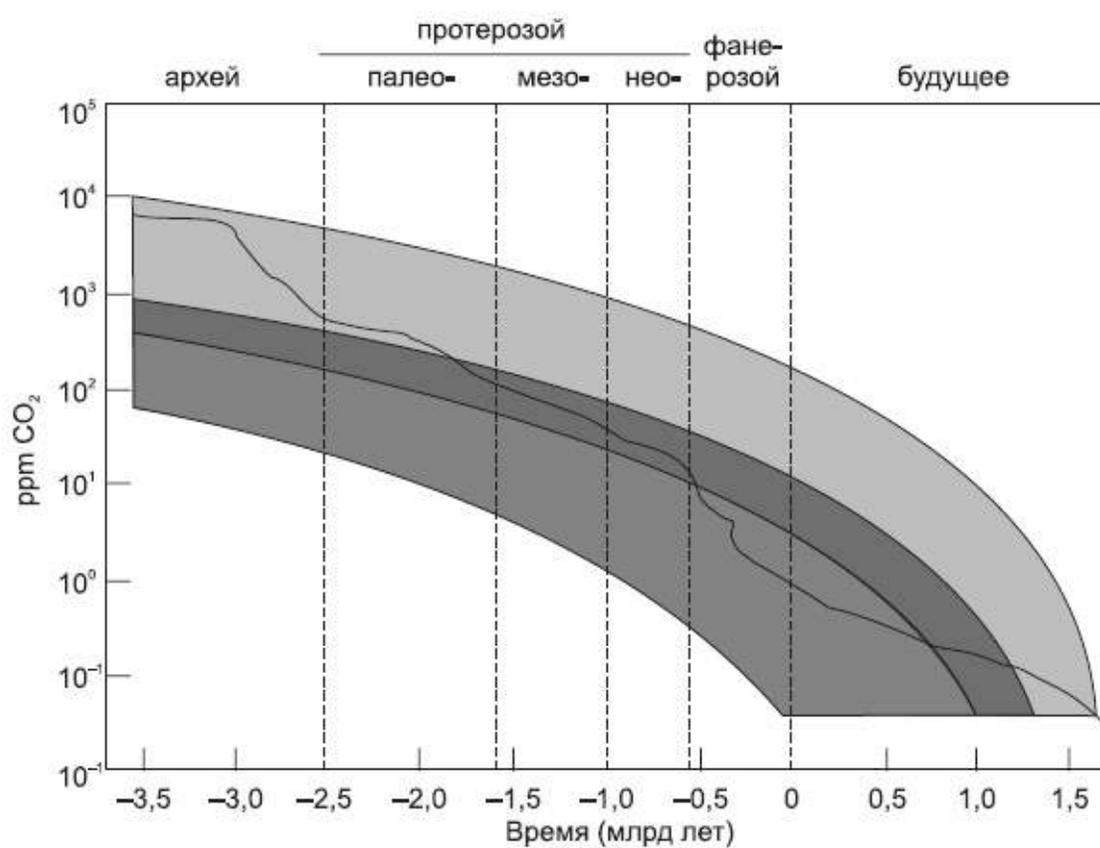
Около 4,6 млрд лет назад^[29] Земля образовалась слиянием нескольких планетных «кирпичиков», или малых тел, состоящих из твердых пород и застывших газов, конденсированных в плоскости эклиптики. 4,567 млрд лет назад (и датировать оказалось проще, и запомнить легче) в формирующуюся Землю, по всей вероятности, врезался небесный объект с Марс величиной, что привело к смешению никелево-железных ядер сплавленных в Протоземлю планет. Тогда же образовалась Луна — из кремниевых паров, возникших сразу после столкновения. Следующие несколько сотен миллионов лет планету безжалостно бомбардировали многочисленные метеориты.

Температуры, подходящие скорее для кипящей лавы, и энергетические выбросы от постоянной метеоритной бомбежки, естественно, создали невыносимые для существования жизни условия на поверхности Земли^[30]. Энергия, возникающая от бесконечного потока астероидов и метеоритов, около 4,4 млрд лет назад порождала температуру, способную плавить скалы и держать их в таком расплавленном состоянии. Не было никаких шансов, чтобы на поверхности сохранялась жидкая вода.

Новая планета стала быстро изменяться после основного слияния исходных тел. Около 4,56 млрд лет назад у Земли начали образовываться различные слои. Внутри из железа и никеля сформировалось ядро, которое окружила мантия — менее плотный слой. Над мантией возник тонкий, быстро затвердевающий и еще менее плотный слой земной коры, состоящий из твердых горных пород, а над ним клубилась атмосфера — пар и углекислый газ. Несмотря на то что поверхность оставалась безводной, большие запасы воды оказались заперты внутри планеты и вырывались наружу в виде пара. Поскольку более легкие элементы поднимались наверх, а более тяжелые опускались, вода и другие летучие соединения были извергнуты из недр Земли и заполнили атмосферу^[31].

Молодая Солнечная система насчитывала несколько планет, а также вокруг Солнца вращался космический мусор в большом количестве, который не участвовал в планетообразовании. Но не все орбиты этих небесных тел были устойчивыми эллипсами, как сегодня. Многие были очень искривлены, многие проходили между вращающимися планетами и Солнцем. Солнечную систему, таким образом, бороздили многочисленные объекты, и длилось это около 4,2–3,8 млрд лет назад. Если принять во внимание широко известную гипотезу о том, что эти космические «путешественники» содержали в себе воду, целые океаны воды, то становится понятно, какую чрезвычайно важную роль сыграли в последующей истории жизни на планете эти кометы и астероиды, непрерывным дождем падавшие на Землю, некоторые совсем крошечные, а некоторые — настоящие монстры до 500 км в диаметре. Кометы приносили с собой не только воду, но и другие важные для жизни элементы, включая соединения углерода. Земле не нужно было далеко ходить за необходимыми для жизни продуктами — она получила их доставкой на дом.

Но за все приходится платить, и жизни тоже пришлось. Ученые из NASA составили математические модели для таких «отчислений». Столкновение с Землей небесного тела в 500 км в диаметре привело почти к невообразимым последствиям. Огромные участки твердой земной поверхности превратились в пар, образовав облако страшно горячего — несколько тысяч градусов — «естественного» газа, испарений. Именно эти испарения в атмосфере привели к тому, что весь океан превратился в пар, улетев вверх и оставив дно, покрытое солью. В конце концов произошло охлаждение, но новый океан обрушился дождем на Землю не раньше чем по крайней мере через несколько тысяч лет. Такие большие астероиды и кометы размером со штат Техас могли выпарить океан глубиной три километра и уничтожить все живое на поверхности Земли^[32].



Изменение во времени концентрации углекислого газа (в миллиардах лет) с приблизительными расчетами на будущее. Ноль обозначает настоящий момент времени.

Около 3,8 млрд лет назад самые ужасные метеоритные атаки остались позади, и все же в то время различные астрономические бедствия обрушивались на планету значительно чаще, чем в более близкие к нам периоды истории. Долгота дня тоже была не такая, как сегодня — не более 10 часов, потому что Земля тогда вращалась быстрее. Скорее всего, Солнце было не таким ярким — возможно, красным и не таким горячим, поскольку не только горело с меньшей энергией, но и его лучам приходилось пробиваться сквозь ядовитые, мутные клубы паров углекислого газа, сероводорода и метана, а кислорода ни в атмосфере, ни в океане не было. Небо, по всей вероятности, было оранжевым и красно-кирпичным, а моря, которые предположительно покрывали всю земную поверхность, были коричневой грязью. Тем не менее это был полный комплект газов, жидкой воды и твердой земной коры со множеством минералов, пород и сред, включая и те, которые необходимы для развития жизни в два этапа: добыть много «запчастей» и свалить их в одном месте для дальнейшей сборки.

Системы, необходимые для существования жизни, и их история

Одним из исключительно важных факторов возникновения жизни на Земле стало то, что атмосферные газы достаточно «поредели», что позволило сформироваться «первичному бульону» — добиологическим молекулам, строительному материалу живых организмов. (Здесь стоит вспомнить об окислительно-восстановительной реакции: возникают либо потери от окисления, либо добавление электронов при восстановлении.) Электроны — как деньги, их можно обменять на энергию, при окислении электроны теряются с приобретением энергии, при восстановлении приобретение энергии — это как если бы деньги попали в банк. Например, нефть и уголь «восстановлены», то есть в них накоплено много энергии, которую можно использовать-высвободить, если воздействовать на них окислением, что и происходит, когда мы их сжигаем и получаем энергию.

Состав древней атмосферы на Земле — противоречивая и бурно обсуждаемая область. Если количество азота, наверное, совпадает с сегодняшним, то кислорода либо не было, либо он присутствовал в очень малом объеме, и на это многое указывает. Углекислого газа, однако, было намного больше, чем теперь, и это создавало настоящую баню посредством парникового эффекта с углекислотой, в 10 000 раз превышающей сегодняшний уровень [\[33\]](#).

Наша сегодняшняя атмосфера на 78 % состоит из азота, на 21 % — из кислорода и менее чем на 1 % — из углекислого газа и метана, и этот состав относительно нов. Становится все более очевидным, что наша атмосфера может меняться весьма стремительно, особенно этот обманчиво небольшой 1 %, включающий два газа, ответственных за парниковый эффект (и еще водяные пары) — углекислый газ и метан, которые могут (и это важно) значительно превысить свои нынешние объемы.

Круговорот веществ и мировые температуры

Человеческое тело требует множества сложных процессов, чтобы поддерживать то загадочное состояние, которое мы называем жизнью. Многие из этих процессов включают в себя перемещение углерода. Аналогично круговорот углерода, кислорода и серы есть ключевое условие для поддержания подходящей для жизни среды на Земле. Углерод, конечно же, самый важный.

Углерод претерпевает активное преобразование твердого, жидкого и газообразного состояния. Перемещение этого элемента между океаном, атмосферой и жизненными формами называется «круговорот углерода», и именно это движение углерода и производит самое главное воздействие на изменение планетарной температуры за счет изменений в концентрации парниковых газов.

То, что мы называем «круговоротом углерода», на самом деле состоит из двух пересекающихся процессов: краткого цикла и долгого цикла^[34]. Краткий цикл регулируется растениями. Углекислота включена в фотосинтез, и часть углерода остается в живых тканях растений — результат восстановительной реакции. Таким образом накапливается энергия, которая ждет своего высвобождения. Когда растение погибает или опадают листья, этот углерод переходит в почву и может быть преобразован в другие углеродные соединения в телах почвенных микроорганизмов, других растений или животных, и тогда происходит окисление восстановленного углерода с высвобождением энергии, которой пользуется организм, поглощающий (окисляющий) этот углерод. В то же время организмы также преобразуют другие молекулы углерода в восстановленное состояние, снова запасая энергию. Проходя по пищевой цепочке животных, этот самый углерод в восстановленном состоянии может быть окислен, и его выдыхают в виде углекислого газа — цикл возобновляется. Впрочем, случается, что заключенный в ткани растения или животного углерод — наполненный энергией, восстановленный — сжигают, и он, таким образом, не поглощается другим организмом и не попадает обратно в мировой запас углерода. Такой углерод больше не входит в краткий цикл круговорота.

Долгий цикл углеродного круговорота предполагает совершенно другие типы преобразований. Основное отличие в том, что долгий цикл обеспечивает перемещение углерода из горных пород в океан или атмосферу и обратно. Временные периоды этих перемещений в основном измеряются миллионами лет. Перемещения углерода из твердых пород и обратно могут привести к куда более серьезным изменениям в земной атмосфере, чем в кратком цикле, поскольку в породах содержится во много раз больше углерода, чем в океане, атмосфере и биосфере вместе взятых. Это может показаться странным, учитывая, что сам по себе объем одной только живой материи огромен. Однако Боб Бернер из Йельского университета подсчитал, что если все растения на нашей планете вдруг одновременно сгорят, то весь углерод, попавший из них в атмосферу, увеличит содержание углекислого газа за счет краткого цикла лишь на 25 %. Для сравнения: долгие циклы в прошлые периоды истории Земли приводили к изменениям в 1000 % — как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения.

Большое значение для углеродного круговорота Земли имеет карбонат кальция, или известняк. Этот распространенный на Земле материал составляет основу скелета для большинства беспозвоночных, у которых скелет есть. Его также обнаружили в растительном планктоне — кокколитофоридах (*Coccolithophorids*), которые формируют скелет, аккумулируя осадочную породу, известную как мел. Скелет кокколитов играет важную роль в

поддержании жизни на Земле, поскольку помогает сохранять на приемлемом уровне долговременные температуры. Благодаря движению тектонических плит некоторая часть такого мела перемещается к тектоническим разломам в земной коре на дне океана и попадает внутрь планеты. И вот глубоко под поверхностью Земли жар и давление превращают известковые и кремниевые скелеты в другие вещества, например, в кремниевые минералы, а также в углекислый газ. Далее, с магмой эти минералы и горячий газ прокладывают себе путь наружу, и на поверхность минералы выливаются лавой, а углекислота попадает в атмосферу.

Вот так выглядит круговорот углерода. Углекислота преобразуется в живые ткани, которые потом разлагаются и помогают строить основу другим животным и растениям, а те в свою очередь становятся лавой и газом глубоко под землей — и цикл снова повторяется, как только они попадают на поверхность. Таким образом, долгий цикл углеродного круговорота оказывает серьезное воздействие на состав атмосферы, что, естественно, влияет на температурный режим на всей планете. Итак, процессы осадочных отложений и химическое выветривание являются главными компонентами, определяющими, сколько и как быстро углеродные и кремниевые скелеты формируются в морях, а объем минералов, поглощаемых жадными пастями тектонических разломов, диктует, сколько углекислого газа и метана извергнут обратно в атмосферу вулканы. Весь процесс, стало быть, и контролируется жизнью, и в то же время позволяет жизни существовать. Кроме того, что он отвечает за состав атмосферы, этот процесс произвел то, что мы можем назвать «планетарным термостатом», поскольку именно эффект отдачи и регулирует долговременный режим земных температур.

Термостат работает так: скажем, углекислого газа из вулканов стало больше, что привело к увеличению углекислого газа и метана в атмосфере. По пути к верхним слоям атмосферы многие из этих молекул уносят теплоту от поверхности Земли (теплота попала на поверхность благодаря солнечным лучам), а потом она отражается обратно на Землю. Это и есть парниковый эффект. Чем больше теплоты скапливается в атмосфере, тем выше температура всей планеты, что заставляет воду быстрее испаряться, а водяные пары — тоже парниковые газы. Такое потепление, однако, имеет интересные последствия. С увеличением температуры усиливается и химическое выветривание. Это особенно важно в отношении выветривания кремниевых пород. Как мы могли наблюдать, это выветривание ведет в конце концов к формированию углеродных и кремниевых минералов, но при этом из атмосферы высасывается углекислый газ.

Выветривание усиливается, и все больше и больше углекислого газа выходит из состава атмосферы, и создаются другие химические соединения, которые не имеют уже сильного влияния на мировой температурный режим. С падением уровня атмосферного углекислого газа снижается и температура, поскольку ослабляется парниковый эффект, ведь молекул парниковых газов стало меньше. В то же время выветривание снова ослабляется, так как становится холоднее и оседает меньшее количество скелетов, потому что становится меньше двууглекислых и кремниевых ионов, из которых они формируются. В конце концов в разломы попадает меньше скелетного материала, а в дальнейшем из вулканов вырывается меньше углекислого газа. И вот Земля быстро остывает. Но из-за этого многие экосистемы, например, коралловые рифы или планктонные области на поверхности, уменьшаются в размерах, и, таким образом, из атмосферы начинает поглощаться меньше углекислого газа. В таком случае количество углекислого газа, который выбрасывают вулканы, становится больше, чем могут переработать живые организмы, и цикл возобновляется.

Сильные выветривания зависят не только от температур. Быстрый подъем горной цепи может способствовать усилению эрозии кремниевых пород, и температура здесь роли не

играет. Образование гор стимулирует быстрое выветривание таких элементов, а также уменьшение содержания углекислого газа в атмосфере — Земля быстро теряет тепло. Многие геологи уверены, что «скоростное» рождение таких массивных и неровных гор, как Гималаи, привело и к быстрому сокращению углекислоты, и в результате около 2,5 млн лет назад, в плейстоцене, начался ледниковый период ^[35].

Третий фактор, влияющий на уровень химической эрозии, это тип и количество растительной жизни. «Высшие» (многоклеточные) растения весьма энергичны в деле физической эрозии различных пород и тем самым освобождают пространства и для химического выветривания. Стремительное увеличение растительного покрова или развитие нового типа растений с более глубокими корнями, как, например, у многих деревьев, приводит к тому же результату, что и быстрое возникновение горных массивов: выветривание усиливается, и мировые температуры падают. И наоборот: исчезновение растений — либо из-за массового вымирания, либо по причине человеческой деятельности — приводит к быстрому увеличению тепла в атмосфере.

Даже континентальный дрейф может повлиять на выветривание в мировом масштабе, а значит, и на климат всей планеты. Поскольку выветривание идет быстрее при более высоких температурах, даже в середине очень холодного периода мир станет еще холоднее, если континенты перемещаются от экватора к более высоким широтам.

Химическое выветривание очень медленно проходит в Арктике и Антарктике, а на экваторе — быстро. Перемещение континентов к экватору окажет влияние и на мировой температурный режим. Также многое зависит и от расположения континентов относительно друг друга. Никакие объемы химического выветривания не окажут влияния на температуру планеты, если в океан не попадет достаточное количество минералов и пород, из которых создаются скелеты-основы. Чтобы они достигли моря, нужна текучая вода, но если все континенты сошлись воедино, как это было 300 млн лет назад во время формирования Пангеи, огромные территории суперконтинента будут лишены дождей и рек, которые выпадают в океан. Сколько угодно двууглекислых соединений, растворенного кальция и кремниевых материалов может образовываться в центре гигантских материков, но большая их часть никогда не попадет в Мировой океан.

Рано или поздно без дождей выветривание замедлится даже при высоких температурах, и цикличность процессов не сработает так, как это было бы при разделенных континентах. Из-за слияния материков общая длина побережий будет намного меньше, а это коренным образом скажется на климате, ведь многие приморские области и прочие влажные места окажутся далеко от воды. Пустыни и арктические регионы демонстрируют низкий уровень выветривания и, таким образом, способствуют общемировому потеплению, поскольку атмосферный углекислый газ поглощается слабее.

Показатели углекислого газа и кислорода в фанерозое

Возможно, наибольшее по важности физическое влияние, помимо температурных режимов, на развитие жизни на Земле имели изменения в объемах углекислого газа (для растений) и кислорода (для животных организмов). Относительные количества и углекислоты и кислорода в земной атмосфере определялись и продолжают определяться широким спектром физических и биологических процессов, и для многих людей является большим откровением то, что уровень обоих газов значительно сместился буквально недавно (с точки зрения геологического времени). Но почему же соотношение этих газов вообще меняется? Основными причинами являются множественные химические реакции, в которых участвует все богатство элементов земной коры, включая углерод, серу и железо. Эти химические реакции бывают как окислительными, так и восстановительными. В каждом случае свободный кислород O_2 соединяется с молекулами, содержащими углерод, серу или железо, возникают новые химические соединения, и кислород уходит из атмосферы на «хранение» в форме новых веществ. Кислород высвобождается и попадает обратно в атмосферу посредством других — восстановительных — реакций. Это, например, то, что происходит при фотосинтезе, когда растения выделяют свободный кислород как побочный продукт восстановления углекислого газа в цепи промежуточных реакций.

Было уже много моделей, специально разработанных для того, чтобы показать, как менялся в прошлом уровень углекислого газа и кислорода, в том числе с помощью ряда уравнений, известных как модель GEOCARB — самая ранняя из всех и наиболее подробная^[36]. Эта модель, используемая для вычисления уровня углерода, была выведена Робертом Бернером из Йельского университета. К модели GEOCARB Бернером и его учениками были дополнительно разработаны несколько других отдельных моделей — для вычислений уровня кислорода. Вместе эти модели показывают основные тенденции изменений уровней углекислого газа и кислорода во времени. Эти разработки являются одним из величайших триумфов научного метода познания. Понимание увеличения и уменьшения со временем уровней упомянутых газов есть одно из наиболее важных для изучения развития жизни на Земле открытий последнего времени.

Некоторые считают, что четыре миллиарда лет назад условия и состав элементов на планете были подходящими для возникновения жизни. Но быть подходящей для обитания не означает стать обитаемой. Формирование жизни из неживых элементов, что будет темой следующей главы, кажется нам самым сложным химическим экспериментом, который когда-либо проводился. Суждения астробиологов позволяют думать, будто жизнь на Земле получилась «легко», однако при более внимательном рассмотрении все получается совсем наоборот.

Глава 3

Жизнь, смерть и состояние, недавно между ними обнаруженное

В 2006 году пошел слух, что проводится целая серия любопытных экспериментов, связанных с жизнью, смертью, а также странной и неустойчивой комбинацией этих двух состояний. Сначала все выглядело как досужие разговоры в кругу коллег, потом тема медленно дозрела до последовательных обсуждений на научных конференциях и, наконец, соответствующие открытия расцвели буйным цветом в многочисленных блестящих работах, опубликованных дотоле неизвестными биологами. Марку Роту не суждено было долго пребывать в безвестности, особенно после того как Фонд Макартуров вручил ему грант для гениев в 2010 году Марк Рот — первооткрыватель в своей области, исследователь неизведанной территории. Это человек, который многое может рассказать нам не только о том, что такое «жизнь», но и что такое «жить», а также о том, что одно вполне может существовать без другого, и если не сегодня, то уж точно в те давние времена, когда жизнь на Земле только появилась.

Рот открыл, что близкие к смертельным дозы сероводорода погружают млекопитающих в состояние, которое можно описать только как приостановленная подвижность^[37], анабиоз. В массовой культуре словечко это весьма распространенное, особенно благодаря научной фантастике, однако именно это и происходит на самом деле с живыми организмами, обработанными таким газом. Подвижность останавливается не только в смысле наблюдаемости — подопытные животные больше не двигаются, сильно замедляются сердцебиение и дыхание, но движения нет и на более фундаментальных уровнях. Крайне замедляются нормальные функции тканей и клеток. И происходит даже нечто более удивительное: млекопитающие теряют свою способность к терморегуляции. Они перестают быть теплокровными и переходят в низший класс хордовых — в холоднокровные. При этом они ни мертвы, ни по-настоящему живы, поскольку по своему основополагающему признаку млекопитающих они вроде как мертвы, но смерть эта временная. Она «закончится», если действие газа прекратится через какое-то определенное время, и все нормальные функции восстановятся. Помимо очевидных медицинских перспектив, это новое понимание порядка вещей раскрывает, что именно есть жизнь, а что — нет.

Мысль Рота проста: существует некое состояние между жизнью и смертью, оно не исследовано и имеет несомненный медицинский потенциал, но, кроме того, позволяет понять, как некоторые организмы смогли избежать массового вымирания. Возможно, смерть не является таким уж «непоправимым» событием, как полагают^[38]. Рот надеется, что ему удастся научиться погружать организмы в это пограничное состояние, а затем возвращать обратно. Впрочем, пока у этого явления будет прозвище «приостановленная подвижность», многих это будет вводить в заблуждение. На самом деле, в английском языке^[39] нет слова, которое бы точно описывало суть этого состояния между жизнью и смертью. Киношники называют это «территория зомби» и все такое в том же духе, и, может быть, неповоротливая научная общественность примет этот термин. Но мы в этом сомневаемся.

В одном из важнейших экспериментов Рота участвовали плоские черви — примитивные организмы, тем не менее живые! Конечно же, в сравнении с любым микроорганизмом никакой другой не может быть назван примитивным. Ученый снизил уровень кислорода,

необходимый для дыхания этих червей. Как и всем живым существам, плоским червям необходим кислород — и много. Итак, в закрытом резервуаре, где содержались черви, снизилось содержание кислорода, и постепенно их движения замедлились, а затем они вовсе перестали двигаться. Никакие тычки и толчки не вызывали ответной двигательной реакции. Но на этом Рот свой эксперимент не закончил. Он продолжил уменьшать количество кислорода в воде, где находились черви. Плоские черви пришли в состояние «спячки» — не жизни и не смерти^[40]. Жизнь и смерть, как кажется, — состояния куда более сложные, чем многие из нас думают.

Жизнь и смерть простейших организмов

Млекопитающие — одни из самых сложноорганизованных организмов, но подобные эксперименты, проведенные над ними, также показывают, что жизнь в них, очевидно, сохраняется: сердце по-прежнему бьется, кровь продолжает циркулировать по венам, нервы реагируют на раздражители, и происходит транспортировка необходимых для жизни веществ, хотя все это — в очень медленном темпе. Но что и правда интересно и важно, так это то, как сохраняется жизнедеятельность в намного менее сложных организмах, например, в бактериях и вирусах, особенно если они попадают в среду, лишенную всяких газов, или в очень холодную среду. И это не теоретические вопросы, поскольку постоянно вместе с сильными ветрами микроорганизмы улетают далеко вверх, в верхние слои атмосферы, за пределы озонового слоя — нашего основного щита против ультрафиолета из космоса. Это второй рубеж в изучении жизни и смерти: исследования верхних областей атмосферы Земли.

Через несколько дней или недель, проведенных в верхних слоях земной атмосферы, эти представители недавно открытой экосистемы (которую ученые не очень изящно назвали «верхняя жизнь») — тропосферной флоры и фауны — возвращаются обратно на поверхность планеты^[41]. Но живы ли они, пока находятся в космосе?

С самого начала космической эры всем известно, что бактерии и споры грибов обнаруживаются на самых верхних уровнях земной поверхности, которые только могут быть доступны для воздушных судов. Однако никто не считал, сколько различных видов можно встретить в этой крупнейшей из всех сред обитания на планете, а ведь это пространство, по сравнению с которым другое крупнейшее обиталище живых существ — дно океана — кажется просто мелкой лужей. Однако в 2010 году началась работа, которая показала, что в любой промежуток времени в верхних уровнях могут обитать тысячи видов бактерий, грибов и безымянных родов вирусов. Кроме того, ученые Вашингтонского университета, порыскав на вершинах Каскадных гор в Орегоне, обнаружили, что пыльные ветры из Китая постоянно выносят на западное побережье Северной Америки грибы, бактерии и вирусы^[42].

Факт, что микроорганизмы можно найти так высоко в атмосфере (или что атмосфера может служить транспортным каналом для межконтинентального перемещения опасных вирусов), помимо чисто биологических выводов, представляет еще и непосредственный интерес в контексте темы данной книги, пожалуй, фундаментальный для понимания части нашей истории: перемещение в атмосфере может объяснить, как первичная жизнь распространилась из источника своего зарождения на Земле. Зачем медленно дрейфовать в океане, двигаясь по воле капризных волн и течений, если по ветру можно перепрыгнуть с континента на континент меньше чем за один день. Позже мы еще вернемся к вопросу о значении обитателей верхних уровней в истории жизни на Земле, здесь же обсуждается то, живы эти организмы на протяжении всего своего воздушного путешествия или они находятся в спячке. Вот тут, рассматривая самые базовые формы жизни, мы приходим к выводу, что категории жизни и смерти несколько неполны, а то и некорректны.

Образцы «верхней жизни» собирают тремя способами: с поверхностей списанных военных самолетов, которые летают в верхних слоях атмосферы; с воздушных шаров, которые запускают в верхние слои; а также, когда сильные бури прилетают из Азии через Тихий океан, можно прямо из воздуха взять «понюшку» образца тропосферы высоко в горах. Такой воздух — настоящий «зоопарк» микрожизни. Собранные в горах высоко над уровнем моря микроорганизмы оказываются мертвыми, но перенесенные в более низкие места, на которых они предположительно находились до своего воздушного путешествия, через

некоторое время, необходимое для акклиматизации, вновь оживают.

Многие из нас согласятся, что в отношении млекопитающих, да вообще всех многоклеточных, верно: что умерло, то *умерло*. Но для простейших это не так. Оказывается, между нашими привычными представлениями о жизни и смерти есть целое поле для исследовательской деятельности. И это новое пространство имеет огромный потенциал для понимания первого этапа истории развития жизни на Земле, объясняя, могут ли «мертвые» химические соединения при соответствующих комбинациях и заряде энергии стать живыми. Жизнь, по крайней мере простейшая жизнь, не всегда жива.

И вот наука ищет это место между жизнью и смертью. Возможно, окажется, что первая жизнь на Земле возникла из состояния, которое мы называем смертью, а возможно, из какого-то пограничного состояния, очень близкого к жизни.

Жизнь: определения понятия

Вопрос «Что такое жизнь?» является названием для нескольких книг, а самая знаменитая из них, работа начала XX века, принадлежит перу Эрвина Шрёдингера^[43]. Эта небольшая книжка стала заметной вехой благодаря не только теме повествования, но и профессии автора: Шрёдингер был физиком. До него и в его времена физики насмехались над биологией и считали ниже своего достоинства тратить на нее время. Шрёдингер же начал осмысливать организмы с точки зрения физической науки и в ее терминах: «Порядок атомов в наиболее значимых частях организма и взаимодействие этих упорядоченных комплексов коренным образом отличаются от тех, что физики и химики принимают за объект своей теоретической и эмпирической работы».

В основном книга посвящена природе наследственности и мутаций (она была написана за 20 лет до открытия ДНК, когда природа наследственности все еще была великой тайной), но в финале ее Шрёдингер рассматривал физику «жития», и, в частности, писал: «Живая материя балансирует между разложением и равновесием» и «живет за счет отрицательной энтропии».

Иными словами, жизнь живет за счет метаболизма, то есть, грубо говоря, за счет еды, воды, дыхания, обмена веществ — этот последний и обозначается греческим словом «метаболизм». Это и есть ключ к пониманию природы жизни? Возможно, по крайней мере, для биолога. Но физик Шрёдингер заметил кое-что куда более глубокое: «Считать, что обмен веществ должен быть ключевым фактором — абсурд. Любой атом азота, кислорода, серы и так далее так же хорош, как и другие. В чем выгода такого обмена?» Что такого ценного, что мы называем «жизнь», содержится в нашей пище и не дает нам умереть? Для Шрёдингера ответ был очевиден: «Любой процесс, событие в природе означают усиление энтропии в том месте, где они происходят». Вот в этом и есть секрет жизни: жизнь есть материя, которая усиливает энтропию, и в этом — новая возможность отличить живое от неживого.

Шрёдингер считал, что жизнь поддерживается, извлекая «порядок» из окружающей среды, это что-то, что мы называем неуклюжим словосочетанием «отрицательная энтропия». Жизнь, таким образом, — «приспособление», с помощью которого большое количество молекул поддерживают сами себя на весьма высоком уровне упорядоченности, постоянно «высасывая» эту упорядоченность из своего окружения. Шрёдингер предположил, что организмы не только создают порядок из беспорядка, но также — порядок из другого порядка.

Это и есть жизнь — механизм, который меняет природу упорядоченного и разупорядоченного? С точки зрения физики жизнь можно представить как ряд химических механизмов, совмещенных и как-то урегулированных между собой в единое целое, и которые поддерживают порядок, поглощая для этого энергию. Многие десятилетия это определение жизни было самым авторитетным из всех. Но спустя полвека многие начали пересматривать и дополнять это понимание предмета. Некоторые, как Шрёдингер, были физиками, например, Пол Дэвис и Фриман Дайсон. Но другие были биологами.

Пол Дэвис в своей книге *The Fifth Miracle* («Пятое чудо», 2000)^[44], рассматривая вопрос «Что такое жизнь?», задает другой: «Что *делает* жизнь?» В соответствии с его концепцией жизнь определяется *действием*. Вот основные характеристики жизни.

Жизнь производит обмен веществ. Все живые организмы производят химические соединения и таким образом насыщают свои тела энергией. Но зачем им энергия? Производство и высвобождение энергии организмом и есть то, что мы называем

метаболизмом, и именно таким путем жизнь собирает отрицательную энтропию, необходимую для поддержания внутренней упорядоченности. Кроме того, это же явление можно объяснить в химических терминах. Если организм перестает производить химические реакции (но не в своем теле), это означает, что жизнь организма также прекратилась. Жизнь не только сама поддерживает такое странное состояние, но и находится в постоянных поисках таких мест, где она могла бы получить энергию, необходимую для поддержания такого состояния. Некоторые места обитания на Земле более приспособлены для такой жизненной химии, чем другие (например, коралловые рифы у теплых, пронизанных солнцем поверхностей океана или горячий источник в Йеллоустонском национальном парке) — в таких местах наблюдается изобилие жизни.

У жизни есть усложненность и организация. На самом деле простой жизни — даже если она состоит из горстки (несколько миллионов) атомов — не существует. Все жизненные формы состоят из огромного числа атомов, упорядоченных самым замысловатым образом. Вот эта организация сложных систем и есть отличительная черта жизни: усложненность — не механизм, а свойство.

Жизнь воспроизводит себя. Дэвис уточняет, что жизнь должна не только создавать свои копии, но также воссоздавать механизм, позволяющий продолжать дальнейшее копирование. Как замечает Дэвис, жизнь также должна включать в себя копию копирующего аппарата.

Жизнь развивается. Как только сделана копия, жизнь продолжает изменения — назовем это развитием. Это совершенно не механический процесс. Машины не растут, не меняют форму и тем более функцию вместе с ростом.

Жизнь эволюционирует. Это одно из основополагающих свойств жизни, неотъемлемое от ее существования. Дэвис описывает эту характеристику как парадокс постоянства и изменения. Гены должны воспроизводиться, а если они не могут этого делать с достаточной регулярностью, то организм умрет. А с другой стороны, если воспроизводство идеально, не будет изменчивости и не будет эволюции путем естественного отбора. Развитие — ключ адаптации, а без адаптации невозможна и жизнь.

Жизнь автономна. Эта характеристика, возможно, самая сложная для определения, хотя для жизни — основная. Организм автономен, то есть самоопределяется, может жить без постоянного воздействия со стороны других организмов. Но то, как эта автономность создается из множества частей и систем организма, по-прежнему остается загадкой.

Действие и сложное строение — одно и то же для живой системы, то есть деятельность системы состоит из непрерывного производства (и воспроизводства: белок живет не более двух дней) всех процессов и компонентов, которые объединяют все в одну производственную единицу. С этой точки зрения именно постоянное воспроизведение и обновление жизненных форм и есть сама жизнь.

Конечность, временный характер этого жизненного цикла молекул — самый важный момент для жизни в целом — недооценивался как главный ключ к пониманию того, где первая жизнь могла зародиться. Определение жизни, которое дают специалисты NASA и которое основано на любимом изречении Карла Сагана, весьма простое и заключается в следующем: «Жизнь есть химическая система, способная к дарвинистской эволюции»^[45]. Здесь есть три опорных понятия. Во-первых, мы имеем дело с химическими веществами, не только с энергией.

Во-вторых, имеются в виду не просто вещества, но химические *системы*. Таким образом, между веществами происходит взаимодействие, они существуют не сами по себе. Наконец, речь идет о химических системах, которые *обязательно подвергаются дарвинистской эволюции*. Это означает, что в мире индивидов намного больше, чем запасов

энергии, которая их обеспечивает — то есть некоторые умрут. Те, кто останется, выживут потому, что они являются носителями выигрышных унаследованных качеств, которые передадутся их потомкам, и, значит, обеспечат им большую способность к выживанию. Такое определение NASA/Сагана хорошо тем, что не смешивает понятия «жизнь» и «быть живым».

Что за сила соединила мертвые химические вещества так, чтобы они стали живыми? Была ли эта сила метаболизмом, а к ней уже добавилась способность к воспроизведению, или, может, все было наоборот? Если первыми являлись примитивные метаболические системы, то они обязательно должны были иметь какую-нибудь закрытую клеткообразную оболочку, и в дальнейшем у них должна была появиться способность порождать и содержать в себе молекулу, несущую информацию. А если сначала появились порождающие молекулы (такие как РНК или их варианты), то потом им необходимо было занять энергетическую систему, которая бы поддерживала процесс воспроизведения и позднее приобрела бы оболочку. Вот как противоречива эта проблема первичности метаболизма и воспроизводства, поставленная на химическом/молекулярном уровне: первым был белок? или полинуклеотид? Оба ли они живые? И какой путь каждому пришлось пройти от просто химических реакций до той реакции, которая породила жизнь? И если основополагающей характеристикой для живой клетки является поддержание равновесия системы, гомеостаз (то есть предполагается, что поддерживаются более-менее устойчивые химические реакции в постоянно меняющемся окружающем пространстве), то следует, что первым должен быть метаболизм. Насыщение перед размножением кажется более приемлемым положением вещей на сегодняшний день, но что касается происхождения жизни, вопросы остаются.

Энергия и определение жизни

Теперь следует рассмотреть, какую роль играет в поддержании жизни энергия. Мы определили жизнь как нечто, наделенное метаболизмом, способностью к воспроизведению и эволюционированию. Но давайте не будем рассматривать жизнь и в отрыве от энергетических потоков и преемственности порядка/беспорядка. Ясно, что для жизни недостаточно просто обладать энергией, должно быть какое-то энергетическое взаимодействие, а взаимодействие это необходимо на всех основных уровнях, чтобы поддерживать состояние неравновесной упорядоченности. Без энергии жизнь преобразуется в не-жизнь — таким образом, определение жизни не обойдется без учета поглощения и выделения энергии. Чтобы сохранить себя, жизнь стремится к состояниям, позволяющим ей постоянно укреплять свою упорядоченность через включенность в энергетические потоки. Наш тип жизни обеспечивает себя относительно малым количеством комбинаций углерода, кислорода, азота и водорода с включением некоторых других элементов в еще меньшем объеме. Таким образом возникает и существует именно та степень усложненности и взаимопроникновения, которую мы называем «жизнь». Входящий поток энергии должен быть достаточно сильным, чтобы преодолеть тенденцию химических процессов к возвращению к равновесию, то есть превратиться из живых в неживые.

То, что жизнь сопровождается обменом веществ, является одним из фундаментальных аспектов определения жизни. Для жизни на Земле первичными источниками энергии стали жар подземных недр и тепло солнечного света, последнее само по себе есть энергия — результат солнечных термоядерных реакций. Наиболее общий способ получения энергии от Солнца — фотосинтез. В этом процессе солнечный свет дает энергию для преобразования углекислоты и воды в углеродные соединения со многими химическими связями, накапливающие энергию. При распаде этих связей энергия высвобождается. Жизнь на Земле использует большое разнообразие биохимических реакций, все они включают перенос электронов. Но эта система работает, только если есть так называемый электрохимический градиент. Чем круче падение градиента, тем больше энергии высвобождается. Это означает, что некоторые типы метаболизма вырабатывают больше энергии, чем другие. Так же, как некоторые среды потребляют энергии больше прочих. Органические, углеродосодержащие соединения, обладающие наибольшим количеством сохраненной энергии, — это жиры и липиды, длинные углеродные цепочки, хранящие много энергии в своих химических связях.

Обмен веществ — это сумма всех химических реакций в организме. Вот вирус — он очень мал, типичные вирусы не более 50–100 нанометров в диаметре (учтем, что нанометр равен 10⁻⁹ м). Делятся вирусы на две группы: одни заключены в белковую оболочку, другие имеют и белковую оболочку, и дополнительное покрытие вроде мембраны. Внутри этих оболочек находится самая важная часть вируса — его геном, нуклеиновая кислота. В одних это ДНК, в других — только РНК. Число генов также сильно различается: от трех (например, оспа) до более чем 250 отдельных генов. Существует огромное количество вирусов, и если бы они считались живыми организмами, то заняли бы очень большое место в биологической классификации. Но вообще-то их относят к неживой природе.



Переработанная нами версия древа жизни, которая включает вирусы и вымершие образцы РНК-жизни. Данный вариант древа жизни требует новой систематической категории, превосходящей домен (который в свою очередь превосходит царство). РНК-жизнь нельзя вписать в принятое древо жизни. (см.: Питер Уорд. «Жизнь, которую мы не знаем» (Peter Ward, *Life as We Do Not Know It*, 2006).

Вирусы, которые содержат только РНК, демонстрируют, что РНК сама по себе, в отсутствие ДНК, может содержать информацию и служить фактической молекулой ДНК^[46]. Это доказывает, что до ДНК и появления жизни мог существовать «мир РНК»^[47]. И существование вирусов с РНК без ДНК позволяет сделать еще более удивительный вывод.

Вирусы — паразиты. Технически они классифицируются как внутриклеточные паразиты, поскольку не могут размножаться без клетки-хозяина. В большинстве случаев вирусы внедряются в клетку живого организма, захватывают органеллы, производящие белок, и начинают производить себе подобных, превращая пораженную клетку в завод по производству вирусов. Вирусы, таким образом, имеют огромное влияние на биологию зараженных «хозяев».

Самым сильным аргументом против вирусов как живых организмов является тот факт, что они не способны к самостоятельному воспроизведению и поэтому не соответствуют понятию «живой». Но следует помнить, что вирусы — безусловные паразиты, а паразиты имеют тенденцию подвергаться значительным морфологическим и генетическим изменениям, приспособляясь к своим «хозяевам».

Возникает вопрос: являются ли живыми другие паразиты? Паразитизм, который на деле

есть весьма развитая форма хищничества, вообще рассматривается как результат долгой эволюции. Паразиты — не примитивные создания. Но, как и вирусы, они кажутся не совсем живыми. Роды простейших *Cryptosporidium* и *Giardia*, оба паразитирующие на людях и других млекопитающих, имеют периоды покоя, когда они мертвы, как и любой вирус вне организма хозяина. Без хозяина эти и прочие организмы (и тысячи других) не живут и, вероятно, не могут быть причислены к живым. Однако, попадая в хозяина, они демонстрируют все признаки жизни, которые мы знаем: метаболизм, воспроизводство, проходят отбор по Дарвину. Но если мы допустим, что вирусы — живые, а это мнение получает все более широкое распространение, то нам придется радикально переосмыслить существующее представление о древе жизни на Земле.

К вопросам о жизни на Земле можно добавить еще несколько: каково самое простое соединение атомов, которое можно назвать живым? Какова самая простая форма жизни на Земле? И что ей необходимо, чтобы остаться живой? Чтобы ответить на эти вопросы, нам необходимо понять, что требуется текущим формам жизни на планете для обретения и поддержания того состояния, которое мы выше определили как «живое». А для этого мы кратко опишем всю ту химию, которая вовлечена в процессы обретения и поддержания жизни.

Неживые составляющие земного живого организма

Из всех веществ, необходимых для жизни, нет более важного, чем вода, причем вода в одном состоянии — жидком, не в твердом (лед) и не в газообразном (пар). Земная жизнь состоит из молекул, купающихся в жидкостях. Вообще, хотя в жизненных формах можно найти много больших неустойчивых молекул, на самом деле в основном жизнь использует только четыре основных типа: липиды, углеводы, нуклеиновые кислоты и белки — и все они либо погружены в жидкость (в живом организме — в воду с растворенными солями), либо служат внешними стенками для содержания молекул и воды.

Липиды, жиры, являются ключевыми ингредиентами для клеточных мембран. Они водоустойчивые из-за множества атомов водорода, но содержат мало кислорода и азота. Липиды — основные компоненты клеточных границ, стенок, которые разделяют внешнюю среду и внутреннее пространство клетки, которую мы называем живой. Эти мембраны очень тонки, они контролируют проникновение веществ в клетку и выделение веществ из нее.

Углеводы — второй важнейший тип структур, из которых состоит жизнь, их попросту называют сахара. Соединив их «цепочкой», мы получим полисахарид, то есть «много-сахарид». Углеводы, один он или их много, являются важным строительным материалом, поскольку обладают способностью соединяться друг с другом или с другими органическими и неорганическими молекулами и образовывать молекулы большего размера.

Сахара весьма значимы еще и потому, что являются строительным элементом для следующего типа жизненных молекул — нуклеиновых кислот. Представители этой группы хранят генетическую информацию каждой клетки. Это — молекулы-великаны, в которых объединены сахара и азотсодержащие соединения, называемые нуклеотиды, которые в свою очередь созданы из меньших единиц-оснований, фосфора и других сахаров. В такой структуре самыми важными являются основания — именно они и становятся «буквами» генетического кода.

ДНК и РНК — сахара, которые из всех важных молекул жизни занимают самое главное место. ДНК, имеющая два «позвоночника» (знаменитая «двойная спираль», описанная ее открывателями, Джеймсом Уотсоном и Фрэнсисом Криком), является системой хранения информации самой жизни. В ДНК встречается четыре вида азотистых оснований: аденин, гуанин, тимин и цитозин. Азотистые основания одной из цепей соединены с азотистыми основаниями другой цепи водородными связями согласно принципу комплементарности: аденин соединяется только с тимином, гуанин — только с цитозином. Порядком пар обеспечивается язык жизни — это гены, которые кодируют сведения о той или иной форме жизни.

ДНК — носитель информации, а РНК? А РНК имеет только одну цепочку и является слугой для ДНК — приводит информацию в действие, или обеспечивает производство белков. Молекулы РНК схожи с ДНК, имеют спираль и основания, но отличаются обычно (но не всегда) тем, что спираль только одна.

Почему ДНК и РНК так сложно устроены? Дело в том, что информация нужна как для первичного строительства («закладка фундамента»), так и для дальнейшего решения и выполнения множества прочих задач, для того чтобы «здание» оставалось живым. ДНК — это инструкция по сборке, строительству, ремонту, а также по производству копий самой себя и всего, что в ней есть закодированного. Согласно компьютерной терминологии ДНК — это «программное обеспечение», она несет в себе информацию, но выполнять предписанное этой информацией сама не может. А белки можно принять за компьютерное «железо», аппаратное

обеспечение, оно нуждается в «софте», который указывает, когда и где должны произойти те или иные химические изменения, чтобы произвести материалы, необходимые для жизни РНК имеет интересное свойство быть как программным, так и аппаратным обеспечением, а в некоторых случаях — и тем и другим одновременно.

Белок, последний из обсуждаемых ключевых материалов, имеет четыре функции для земной жизни: строительство других больших молекул, ремонт других молекул, перемещение материалов и обеспечение энергетических запасов. Белки также преобразовывают большие и малые молекулы для самых разнообразных целей и служат средством сигнализации между клетками. Существует огромное количество разнообразных белков, и мы только еще изучаем, как они работают и что именно они делают. Новым открытием, например, является то, что в выполнении своих функций для белка очень важна его схема, структура.

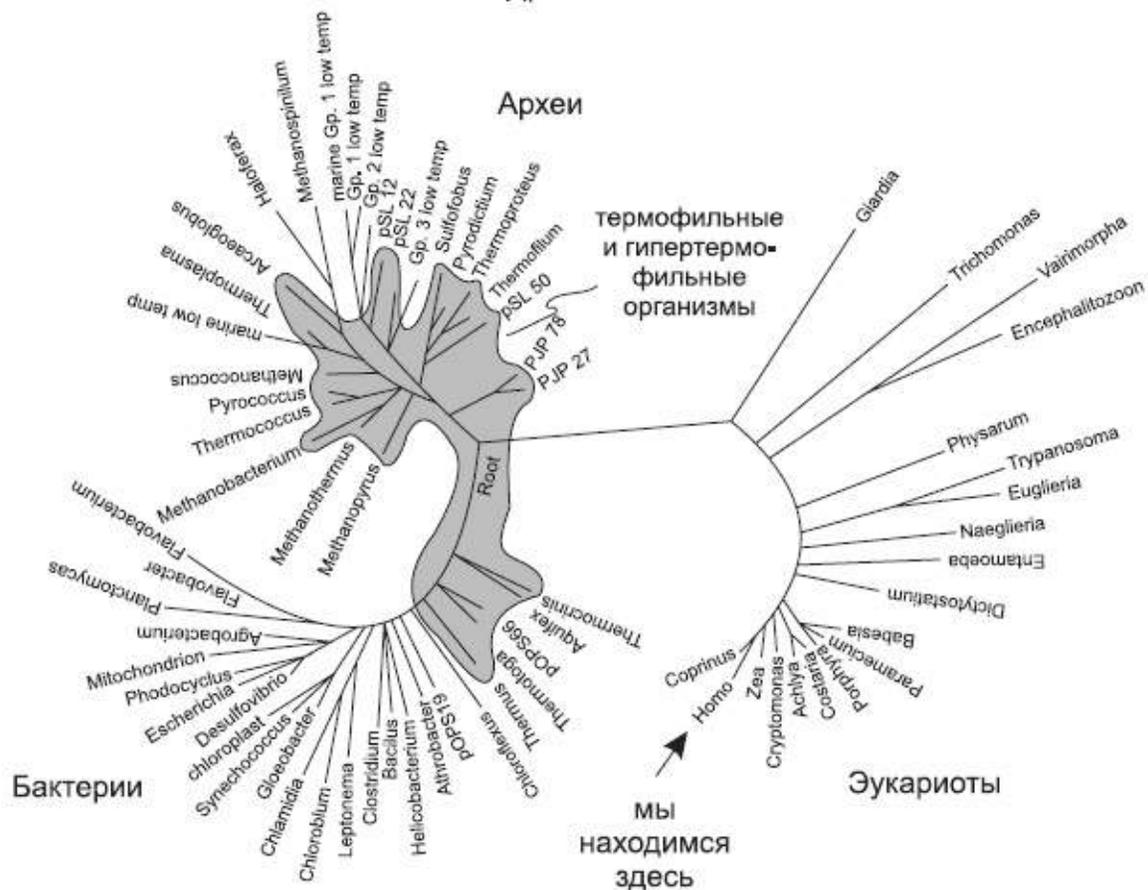
Все белки на Земле строятся на основе одних и тех же двадцати аминокислот. В начале XXI века мы задаем себе все тот же вопрос: эти постоянные 20 кирпичиков используются потому, что являются самым удобным строительным материалом, или потому, что они были обычным материалом в тот момент, когда возникла жизнь, а потом стали постоянно копироваться жизненными формами? Кажется, скорее всего, причиной послужило первое — они самые лучшие, по крайней мере, согласно исследованиям 2010 года^[48]. Эта группа из 20 аминокислот является специфичной для Земли и, вероятно, признаком жизни именно на Земле.

Белки конструируются в клетках нанизыванием различных аминокислот в одну длинную линейную цепочку, которая в своем окончательном виде сворачивается, лишь когда все аминокислоты оказываются в ней на своих местах. Иногда белковая цепочка сворачивается в момент своего создания. Поскольку создание белка происходит добавлением аминокислот по одной в линейном специальном порядке, этот процесс часто сравнивают с построением письменного предложения, роль слов в котором играют аминокислоты.

Клетка, покрытая мембраной, полна разных молекул, объединенных в стержни, шары и листы, и все плавают в соленом растворе. В клетке насчитывается около 1000 нуклеиновых кислот и более 3000 разных белков. Все они участвуют в химических реакциях, которые, объединяясь, создают процесс, называемый жизнь. В этой однокомнатной квартирке может происходить множество химических процессов одновременно.

В клетке также находятся около 10 000 отдельных шаров, известных как рибосомы, которые довольно равномерно распределены по внутриклеточному пространству. Рибосомы состоят из трех определенных типов РНК и около 50 видов белков. Также в клетке есть хромосомы, длинные цепочки ДНК, к которым присоединяются специальные белки. ДНК в бактериях обычно расположены в одной части клетки, но не отделены от прочих внутриклеточных элементов мембраной, как это бывает у высших жизненных форм — эукариотов, в клетках которых есть ядро. Спрашивается, что же в клетках «живое»?

Древо жизни



Современное представление «древа жизни». Затемненные области обозначают организмы, выживающие при высоких температурах. На нем отсутствуют многие виды организмов и «до-организмов», предположительно развившихся из неорганических химических элементов и образовавших первую живую клетку.

Бактерия состоит из неживых молекул. Молекула ДНК определенно неживая в любом смысле, который может представить себе здравомыслящий человек. Клетка сама по себе содержит многие множества химических механизмов, каждый из которых по отдельности является неживой химической реакцией. Возможно, клетка жива только как единое целое. Если нам суждено узнать, как возникла жизнь в самом начале, нам необходимо будет найти клетку с наименьшим набором молекул и реакций, которые обеспечивают жизнь.

Одной из основных проблем, возникающих при рассмотрении такой простейшей клетки, является то, что как ни посмотришь, а она не такая уж и простая. Фриман Дайсон выразил этот аспект современности, задав вопрос: «Почему жизнь (по крайней мере, сегодня) такая сложная?»^[49] Если гомеостаз есть необходимый атрибут жизни и если все известные на сегодня бактерии содержат несколько тысяч химических соединений (закодированных несколькими миллионами основных пар ДНК), то, кажется, это и есть минимальный геном. А ведь все бактерии пришли к нам в сегодняшний день после более чем трех, а то и более четырех миллиардов лет эволюции. Возможно, самая простая жизнь на Земле — одна из самых сложных во всей Вселенной^[50].

Глава 4

Появление первой жизни на Земле:

4,2(?)–3,5 миллиарда лет назад

Двадцать восьмого июля 1976 года из тяжелого, в одну тонну, аппарата, который буквально пару дней назад успешно приземлился на Марсе после своего долгого полета с Земли, высунулся механический щуп и взял пробу марсианской почвы. Потом образец с посадочного модуля был передан на космический корабль «Викинг». Это был первый подобный образец, добытый за пределами Земли, — большое достижение инженерии. С этим образцом на «Викинге» были проведены четыре основных эксперимента, и все чтобы проверить наличие жизни или ее процессов. Это вообще было единственной задачей «Викинга» на Марсе — поиск жизни.

Первые эксперименты^[51] дали надежду, что на Марсе действительно есть жизнь, поскольку оказалось, что в почве содержится больше кислорода, чем ожидалось, и более того, химические процессы в собранной почве, по крайней мере, намекали на присутствие микроорганизмов в поверхностном слое Марса. Эти первые проблески спровоцировали такой небывалый прилив оптимизма у научной команды «Викинга», что один из ведущих исследователей проекта, доктор Карл Саган, даже сообщил в *New York Times*: «Возможность существования жизни на Марсе, даже крупных форм, не вызывает никаких сомнений». Под *крупными* формами он подразумевал *по-настоящему* большие, поскольку в том же интервью он развил тему до существования марсианских белых медведей!

Но после тщательного анализа марсианской почвы бортовой спектрограф не выявил никаких следов органической жизни. Марс, как показало это первое исследование «Викинга», казался не только мертвым, но и враждебным жизни. Это навело на мысль, что любую форму жизни, даже если бы она там и появилась, погубили бы ядовитые вещества марсианской почвы. Прежде оптимистичный, Саган теперь мог только надеяться, что второй посадочный модуль «Викинга», который уже кружил вокруг Марса, раздобудет еще какое-нибудь доказательство существования жизни на этой планете.

Третьего сентября 1976 года второй модуль благополучно спустился на поверхность Марса в месте, которое назвали Равнина Утопия. Как и первый, этот здоровенный агрегат успешно справился с задачей^[52]. И, как и в первом случае, не было найдено никаких признаков жизни. Полет «Викинга» был задуман как многоцелевая исследовательская программа, но основной целью был поиск внеземной жизни, помимо изучения химического состава почвы и атмосферы.

Результаты «Викинга» показали, что на Марсе жизни нет^[53], и в NASA стали терять интерес к марсианским исследованиям, поскольку в NASA ориентированы на изучение жизни вне Земли. Однако недостаток интереса со стороны NASA стимулировал развитие другой отрасли науки, той, что тоже сосредоточена на познании чужих миров и, возможно, инопланетной жизни — океанографии.

В первые годы сразу после осуществления проекта «Викинг» стали инвестироваться огромные суммы в технологии, необходимые для исследований океанских глубин, и вскоре аппарат совсем другого типа совершил посадку на чужеродную поверхность. На этот раз жизнь была-таки обнаружена, но совершенно неожиданная по форме. Сперва в Атлантическом океане, а затем, очень быстро, одно за другим были проведены исследования

на глубоководье у Галапагосских островов и в Калифорнийском заливе — маленькая желтая субмарина ALVIN сфотографировала и взяла образцы такого вида жизни, который использует источник энергии, радикально отличный от солнечного света.

Это открытие «фауны разломов» может кардинально изменить наше представление о том, где и как возникла жизнь на Земле, если она вообще возникла именно на Земле. Если жизнь на Земле появилась вскоре после срастания нескольких небесных тел в одну обитаемую планету, то получается, что жизнь не так уж и сложно создать. Но насколько древними являются самые древние жизненные формы и где именно эти первые формы зародились?

Обычно, когда историки пытаются обнаружить что-то «самое раннее», они смотрят в записи еще более древние, то же самое делают исследователи естественной истории Земли. В их случае проблемой становится недостаток пород соответствующего возраста, а также почти полная невозможность для древних бактерий образовывать ископаемые останки.

На протяжении более чем двух десятилетий аксиомой полагалось то, что самый старый след жизни на Земле тянется из заледенелого уголка Гренландии под названием Исуа^[54]. Никаких фоссилий найдено не было. Вместо этого сообщалось, что мелкие минералы-апатиты содержат микроскопические количества углерода — такого, который химически похож (близкий изотоп) на производимый живым организмом. Изученные при этом породы были датированы примерно 3,7 млрд лет, а позже новые данные дали возможность предполагать, что они на самом деле даже старше, около 3,85 млрд лет, и этот факт надолго был «узаконен» учебниками.

Датировка в 3,7–3,85 млрд лет очень хорошо подходила к определению самого раннего времени появления жизни. Как мы упоминали выше, Землю бомбардировали астероиды и прочий космический мусор тогда еще молодой Солнечной системы — около 4,2–3,8 млрд лет назад. Великий Карл Саган высказал свое знаменитое предположение, что жизнь, даже если она тогда уже сформировалась, была полностью уничтожена, он назвал это «крушение жизни» (*Impact Frustration of Life*^[55]). Таким образом, возраст пород в Исуа идеально соответствовал гипотезе, согласно которой тяжелый космический обстрел уже закончился, и жизнь вполне могла зародиться. К несчастью для такой стройной теории, новый инструментарий XXI века позволил установить, что мельчайшие частицы углерода из Исуа вовсе не были органического происхождения^[56].

Следующей по древности была датировка жизни в 3,5 млрд лет, и в этом случае данные были основаны на ископаемых, а не только на химических сигналах — американский палеонтолог Уильям Скопф обнаружил волокнистые формы в агате, возраст которых датировался 3,5 млрд лет^[57]. Эти ископаемые были найдены в ранее неисследованных древних породах, расположенных в одном из наименее обитаемых на планете мест — в нагромождении кремнистого известняка в Западной Австралии. Точное географическое местоположение этих ископаемых останков в сухой пыли австралийской пустоши называется «Северный полюс» — ироничное прозвище места, которое на самом деле является самым жарким на Земле и находится географически, а главное климатически, настолько далеко от Арктики, насколько только можно себе представить.

Открытие Скопфа всколыхнуло научную общественность, так как оказалось, что жизнь на Земле и правда может оказаться очень древним явлением. Целых 20 лет эти австралийские окаменелости считались самым старым свидетельством жизни на планете. А затем и это также подверглось сомнению: оксфордский ученый Мартин Бразье заявил, что так называемые самые старые отпечатки жизни на Земле — просто крошечные отпечатки

кристаллов, а вовсе не ископаемые жизненных форм^[58].

За этим последовало нечто, похожее на уличную потасовку, одну из самых крупных за всю историю науки. Приверженцы обеих точек зрения предпринимали сокрушительные атаки и контратаки. Битва продолжалась несколько лет, и Скопф постепенно терял позиции, и не только в результате нападков со стороны оксфордской армии по поводу толкования природы австралийских отпечатков, но затем и в связи с высказанными сомнениями по поводу возраста самих пород, в которых останки были найдены. Около 2005 года Роджер Бюик из Вашингтонского университета сделал заявление, что если даже крошечные объекты из Западной Австралии вообще являются ископаемыми останками живых организмов, то породы сами по себе значительно моложе, чем то утверждает Уильям Скопф, — более чем на миллиард лет моложе! Это не опровергает того, что они все же очень древние (любые окаменелости, которым приписывают миллиарды лет, рассматриваются как древние), но уж к древнейшим формам жизни на Земле они никак не относятся. Вот после двух-трех таких ударов австралийские окаменелости вылетели из круга древнейших ископаемых.

Такое положение сохранялось до 2012 года, когда уже упомянутый Мартин Бразье опубликовал (в соавторстве) статью^[59], в которой описывалась форма жизни, датированная по крайней мере 3,4 млрд лет, и таким образом, по словам авторов, была самым древним свидетельством жизни из когда-либо обнаруженных. Эта находка была тем более значимой, что сами обнаруженные ископаемые, все микроскопические, по размерам и форме совпадали с определенным типом бактерий, живущих на Земле сегодня. Эти самые древние формы жизни обитали в море, для их жизни, вероятно, нужна была сера, и они быстро погибали даже от небольшого количества молекул кислорода. И хотя такая жизнь все еще соответствует нашим представлениям об «углеродной» жизни вообще, в наше определение того, как возникла жизнь, следует внести поправки с учетом роли серы^[60].

Ископаемые, описанные в работе Бразье, по-видимому, имеют отношение к живущим сегодня на нашей планете микроскопическим бактериям, которым также необходима для жизни сера и которые тут же умирают даже от небольшого воздействия кислорода. Если это открытие подтвердится, то станет ясно, что жизнь на Земле возникла в местах, крайне отличных от большинства земных условий, и что зависела она от наличия серы, а не кислорода.

Жизнь на Земле обычно ассоциируется с лесами, морями, озерами и небесами в их сегодняшнем виде — и с существами, которые живут в прозрачном воздухе, прозрачной воде или на лугах с зеленой травой. Однако ископаемые, найденные Бразье, происходят из среды, где температуры намного выше сегодняшних средних, где воздух насыщен токсичными газами — метаном, углекислым газом, аммиаком и в не меньшей степени — ядовитым сероводородом^[61]. Такая жизнь знала планету, безусловно, без материков (или даже без всякой суши вообще) и вне пределов недолговечных вулканических островов. В таком окружении жизнь возникла (или прибыла извне — мы об этом еще поговорим на следующих страницах) и процветала на протяжении миллиардов лет. Мы все вышли из этой адской колыбели Земли и несем на себе шрамы и гены того периода, когда начало жизни на планете было насыщено серой.

Вскоре после такого описания раннего периода земной жизни, зародившейся в бескислородной, богатой серой среде, на Красную планету был доставлен марсоход «Кьюриосити»^[62]. А почти сразу после этого события Бразье задали вопрос, могут ли серные микроорганизмы, чьи окаменелые останки он только что нашел, жить на Марсе. После минутного замешательства он ответил: «Да»^[63].

Если окажется, что форма жизни возрастом 3,4 млрд лет — самая древняя, то это поставит под сомнение очень многие современные прописные истины относительно того, где могла зародиться жизнь на Земле. Наша планета в те времена уже была достаточно древней сама по себе — Земля возникла как результат слияния нескольких небесных тел 4,567 млрд лет назад. Если эти ископаемые действительно первые формы жизни, то зарождение жизни произошло относительно легко.

Чтобы возникла жизнь, необходимо соблюдение четырех этапов:

1. Синтез и накопление малых органических молекул, таких как аминокислоты и молекулы-нуклеотиды. Накопление веществ, называемых фосфатами (один из самых распространенных видов удобрений), также должно быть важным условием, поскольку они являются «скелетом» для ДНК и РНК.

2. Объединение этих молекул в более крупные, такие как белки и нуклеиновые кислоты.

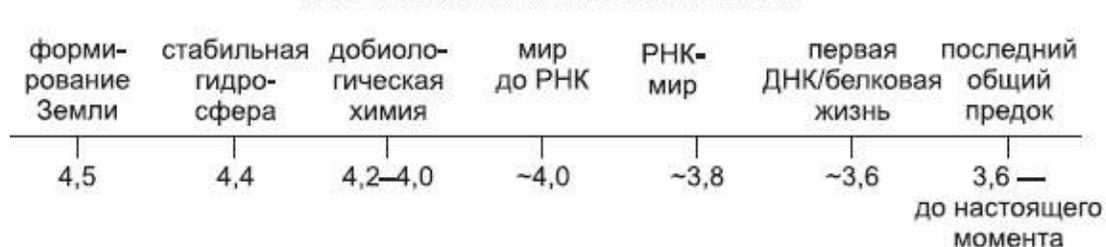
3. Скопление белков и нуклеиновых кислот в капли, которые приобрели бы химические характеристики, отличные от окружающей их среды, — образование клеток.

4. Возникновение способности к самокопированию крупных и сложных молекул и установление наследственности.

В то время как некоторые из этих этапов можно воспроизвести в лабораторных условиях — синтез РНК или даже более сложной ДНК, другие этапы невоспроизводимы. Нет ничего сложного в том, чтобы создать аминокислоты — строительные кирпичики жизни — в пробирке, как это было продемонстрировано в эксперименте Миллера — Юри в 50-е годы XX века. Оказалось, что создание аминокислот в лаборатории сравнимо с намного более сложным процессом искусственного создания ДНК. Проблема в том, что такие сложные молекулы, как ДНК (или РНК), нельзя просто собрать в стеклянной колбе из разных химических элементов. Эти органические молекулы имеют свойство разрушаться при повышенных температурах, а значит, они могли возникнуть только при умеренном температурном режиме.

Жизнь на Земле предполагает наличие РНК и ДНК. Если появляется РНК, то это открывает путь к возникновению ДНК, поскольку РНК рано или поздно произведет ДНК. Но как появилась первая РНК? При каких условиях? В какой среде? Все это — основные вопросы места и времени происхождения жизни на Земле. И недостатка в предположениях, в каком именно месте возникла жизнь, нет.

Основные этапы возникновения жизни



Первая, самая знаменитая и наиболее долго продержавшаяся модель зарождения жизни на Земле принадлежит Чарльзу Дарвину, который в письме к одному своему другу предположил, что жизнь возникла в некоем «мелком, прогретом солнцем пруду». И до конца 70-х годов XX века, пока не состоялись те самые глубоководные экспедиции к разломам, эта гипотеза была самой популярной, да и сейчас такой тип природных условий, будь то пресный водоем или морская отмель, признается убедительным кандидатом на звание колыбели жизни. Другие ученые начала XX века, такие как Джон Холдейн и Александр Опарин, согласились с Дарвином и развили его теорию^[64]. Они, независимо друг от друга, предположили, что молодая Земля имела «восстанавливающую» атмосферу, то есть антагонистичную той, где продуцируется кислород. В такой атмосфере, например, никогда не будет ржаветь железо. Атмосфера того времени, возможно, была насыщена метаном и аммиаком, формируя идеальный «первичный бульон», из которого жизнь и появилась в каком-нибудь мелком водоеме.

До 1950–1960-х годов, таким образом, было принято считать, что в атмосфере ранней Земли, предположительно состоящей из метана и аммиака, простые неорганические вещества с помощью воды и энергии могли произвести органические аминокислоты^[65]. Все, что было нужно — это подходящее местечко, где могли бы соединиться все эти разнообразные вещества. Вроде бы наилучшим местом для этого является мелкий пруд с запашком сероводорода или котлован на берегу теплого мелкого моря, наполненный водой, доставленной приливной волной. И вот, как предполагает эта теория, в таком месте появляется «первичный бульон» из органических молекул и поджидает своего доктора Франкенштейна, который бы его оживил.

Оценивая возможные природные условия ранних этапов истории Земли, многие ученые сомневаются в правдоподобии такого сценария. Органические соединения, необходимые для формирования жизни, очень усложнены и легко распадаются при нагревании растворов. Более того, чтобы вывести такой «первичный бульон» из равновесия (что необходимо), понадобится очень и очень много энергии. Дарвин в свое время просто не мог учесть того, что механизмы, ведущие к формированию Земли (и других землеподобных планет), порождают мир, который на ранних этапах своего существования является жестоким и ядовитым — это место, максимально непохожее на идиллический маленький прудик, который представляли в XIX–XX веках.

Погружения аппаратов ALVIN в 1980-х годах, упомянутые в начале этой главы, показали возможность другой гипотезы, за которую ратовал Джон Баросс из Вашингтонского университета: жизнь на Земле возникла в недавно открытых глубоководных впадинах^[66]. Вскоре новые методики молекулярных исследований, примененные для классификации глубоководных микроорганизмов, подтвердили эту гипотезу. ДНК свидетельствует, что жизнь провела свои первые миллионы лет в горячей воде, на самом деле — в очень горячей воде.

Большинство обнаруженных в океанических разломах микроорганизмов принадлежат к биологическому надцарству *археи*. Последние, скорее всего, являются самой старой из известных на Земле ветвей живых организмов. Старейшие же из них — термофилы. Это такие, которые процветают в почти кипящей воде. Это кое-что, чего в прудах не найдешь. Таким образом, получается, что микроорганизмы глубоководных впадин — очень древние^[67].

Во времена сильной космической бомбардировки в период с 4,4 до 3,8 млрд лет назад

каждый удар (кометы диаметром около 500 км) частично или полностью превращал земные океаны в пар температурой в несколько тысяч градусов. Именно этот пар и стирал с лица Земли всю только-только зарождавшуюся жизнь. Потом следовало похолодание, однако новый океан не мог пролиться дождем еще несколько тысяч лет, и трудно себе представить, чтобы какие-либо организмы могли выжить на поверхности Земли.

Влияние космической бомбардировки ранее не рассматривалось в исследованиях о происхождении жизни на планете. Но теперь мы знаем, что в период, когда на Земле вообще могли зародиться жизненные формы, единственными местами, где это могло произойти, были либо глубокие океанические впадины, либо недра самой земной коры. Возможно, лишь глубины морей или земной коры и давали защиту первичным формам жизни.

Даже около 4 млрд лет назад суши почти не было. Вулканическая деятельность и извержения лавы были куда более привычным делом, чем теперь, и намного более мощным. Давным-давно глубоководные хребты и разломы (которые исследовались маленькими подводными аппаратами в 1970-х годах) были намного длиннее и активнее: вулканы с огромной энергией выбрасывали в океан большие количества веществ и соединений из земных глубин. Химический состав морской воды совершенно не походил на сегодняшний. Океан был «восстанавливающим» (в отличие от нынешнего «окисляющего»), поскольку в нем отсутствовал свободный кислород, растворенный в воде. И по температуре вода была как кипяток.

Содержание углекислоты в атмосфере превышало сегодняшний уровень, наверное, во много раз — от 100 до 1000. Также на поверхности присутствовало убийственное ультрафиолетовое излучение. Чтобы образовался пруд, необходима суша, а во времена появления первой жизни суши на поверхности Земли, вероятно, не было. Скорее всего, там был только один сплошной горячий, ядовитый океан от полюса до полюса.

Минеральный состав поверхностей гидротермальных впадин

Гидротермальные разломы и их жизненные формы, которые способны выживать в экстремальных условиях, включая многочисленных любителей горячих вод — архей, все еще рассматривают как наиболее вероятное место появления первичной жизни. И в отличие от ранних океанов и атмосферы, химия гидротермальных впадин сильно «восстанавливающая». Впадины выбрасывают химические соединения, вполне подходящие для эволюции жизни, — например, сероводород, метан, аммиак, — и много горячей воды. Химический состав впадин очень отличается от состава атмосферы, а значит, развитие жизни могло происходить независимо от атмосферного влияния. Это снимает проблему непригодности древней атмосферы Земли для существования жизни. Однако теория «разломного происхождения» имеет свои проблемы. Как могла РНК, такая крайне нестабильная молекула, сформироваться в разломах с их-то высокими температурами и давлением?^[68] Давайте рассмотрим интересную новую теорию происхождения жизни немецкого ученого Гюнтера Вехтерсхойзера — химика и патентоведа.

Первая жизнь могла сформироваться на поверхностях минералов, содержащих сульфид железа, — так, по крайней мере, утверждает уважаемый Гюнтер Вехтерсхойзер. Он назвал свою теорию «миром железа и серы»^[69]. Гипотеза состоит в том, что первая жизнь («организм-первооткрыватель» Вехтерсхойзера) зародилась под высоким давлением в глубине горячих вод гидротермального источника, образованного вулканической деятельностью в море. Вулкан выбросил в морскую воду поток горячих, насыщенных минералами пузырей вдоль морских трещин протяженностью в тысячи километров. Жизнь возникла при температурах, которые на поверхности Земли привели бы к закипанию воды (100 °С). Под давлением, однако, вода так, как на поверхности, не закипает, а вода из разлома была насыщена разнообразными элементами и минералами. Однако для появления какой-либо органики было необходимо, чтобы потоки, вырывающиеся из разлома, сдержали угарный газ, углекислый газ и сероводород, углерод и сера из которых могли бы участвовать в образовании аминокислот, а в дальнейшем — нуклеиновых кислот, белков и жиров.

Наросты минералов, содержащих железо, серу и никель, омываемые горячими потоками вулканического происхождения, образовывали небольшие области, которые улавливали из раствора углеродсодержащие молекулы и химически высвобождали свободные атомы углерода, которые потом объединялись. Когда с атомами железа из различных минералов вступал в реакцию газ сероводород, образовывался минерал серный колчедан («золото дураков»). В результате этой реакции возникали молекулы, содержащие энергию, но очень незначительную. Вехтерсхойзер сообразил, что необходим еще один газ — угарный, который бы служил топливом. Это горючее было чрезвычайно важным элементом того, что происходило потом: медленное накопление и сцепление молекул в частицы, которые в своей итоговой форме станут чем-то принципиально новым и отличным от простой суммы сложенных вместе химических веществ.

Мысль, что минеральные поверхности могут стать исходным материалом для формирования жизни, не нова. Поверхность глины или кристаллы кремниевых минералов, колчедана могли быть теми микроскопическими областями, где накапливались первичные органические молекулы. Эта модель предполагает следующую последовательность: от отдельных кристаллов глины к большим образованиям, а затем — «органическое завоевание»: полностью неорганические молекулы замещаются молекулами на основе углерода, что приводит к формированию органических макромолекул, а потом — к

образованию ДНК и клеток. Как полагал Р. Кернс, первичная жизнь, вероятно, имела несколько характеристик: могла эволюционировать, была примитивной, с малым количеством генов (участки ДНК, отвечающие за производство определенных белков) и имела малую биологическую специализацию, была сформирована из геохимических веществ, появляющихся в результате реакции конденсации на твердых поверхностях колчедана (сульфида железа).

Угарный газ и сероводород известны как убийцы живого, на их счету много человеческих жертв, причем смерти были вызваны как умышленными преступлениями, так и непреднамеренно. И тем не менее, если мысль Вехтерсхойзера верна, то получается, что путь жизни проложили два ядовитых газа и «золото дураков». Эту идею сам Вехтерсхойзер выразил так: «Самым первым предком всего живого была не отдельная живая клетка, а лабиринт минеральных ячеек, объединенных с катализирующими реакцию железом, серой и никелем и заряженных энергией протонного градиента. Эта первая жизнь, таким образом, была пористой горной породой, которая производила молекулы и энергию — вплоть до создания белков и самой ДНК»^[70].

Несколько иной вариант теории Вехтерсхойзера опубликовали в 2003 году Уильям Мартин и Майкл Рассел^[71]. Они развили идею зарождения жизни в геотермальных впадинах, утверждая, что такая природная среда могла произвести не только все необходимые минеральные вещества и запас энергии, но и ключевой аспект жизни — клетку. Их идея заключается в том, что жизнь появилась на основе чрезвычайно высокоструктурированного вещества — сернистого железа (сульфид железа). Место, где предположительно сформировалась жизнь, находилось где-то между адом (очень горячо) и глубоким синим морем (очень холодно), иначе говоря, где-то географически между богатым сульфидами (и очень горячим!) гидротермальным потоком, порожденным вулканами, и морской водой, насыщенной железом. И это не просто теоретическое предположение. Вокруг разломов и подземных источников действительно есть трехмерные решетчатые образования — их можно принять за первичные стенки клеток. Процессы, непосредственно предшествующие синтезу органических молекул, происходили внутри микроскопических ячеек, формируемых возле впадин и источников. Химические события, благодаря которым возник «мир РНК», происходили в стен(к)ах этих минеральных ячеек.

К началу нашего нового века было рассмотрено множество вариантов и догадок относительно места возникновения первой жизни. Древнейшие формы жизни, безусловно, любили горячую среду — такую, которую до сих пор можно найти в геотермальных разломах. Там можно обнаружить все необходимые элементы процесса: химические вещества и достаточную энергию. И наконец, разломы предоставляли своего рода убежище от жестокостей внешнего мира на поверхности Земли, особенно они были хороши как бомбоубежище в течение первого земного миллиарда лет. Но существует и одно серьезное возражение против этой теории. *РНК и, в меньшей степени, ДНК очень нестабильны при высоких температурах, которые присутствуют в геотермальных источниках.* После формирования РНК скачок от нее к ДНК был бы непосредственным, РНК служит моделью-основой для ДНК. Но переход от простых химических соединений к весьма усложненным молекулам все еще остается загадкой.

Биолог Карл Вёзе предлагал еще один возможный путь возникновения жизни^[72] — жизнь могла появиться и до окончания полного формирования планеты и разделения земных слоев на ядро, мантию и кору. Так, в те времена на поверхности будущей Земли было много крупных образований самородного железа, которое вступало в реакции с паром и некоторым количеством жидкой воды, при этом атмосфера была насыщена водородом и углекислым

газом. Водород-то как раз и интересен, поскольку он является сильным стимулятором химических реакций, но из-за своего незначительного веса быстро улетучивается в космос с планет вроде маленькой Земли, Марса или Венеры (газовые гиганты настолько массивны, что могут удерживать водород). В тот период Земля подвергалась частым столкновениям с космическим мусором, большими и малыми телами, и это приводило к тому, что планета постоянно пребывала в клубах пыли и водяных паров. Образовывались высокие облака водяного пара, и их маленькие капельки могли служить как протоки — крошечные объекты со стенками. Солнечный свет мог быть источником энергии, а пыль, поднимающаяся высоко над поверхностью, несла в себе, помимо прочих элементов, и органические молекулы — было много материала для формирования жизни. С учетом насыщенности атмосферы водородом первые живые организмы могли начать развитие, выделяя метан и используя углекислый газ как источник углерода. Микроорганизмы, которые сегодня ведут сходную жизнедеятельность, называются «метанопродукторы». Земля охлаждалась, сформировались океаны, а жизнь пролилась дождем с небес и заселила эти океаны.

Метеоритные кратеры в пустынях

Одну из новейших гипотез о местах возникновения жизни предложили Стив Беннер из Университета Флориды^[73] и соавтор этой книги Джо Киршвинк. Как уже упоминалось выше, самым сложным этапом является переход к РНК, поскольку РНК — очень нестабильна, она большая и сложная и с легкостью распадается. Вода воздействует на нуклеиновые кислоты (цепочки меньших молекул), из которых слагается РНК, и разрушает их. В действительности оказывается, что для создания РНК необходимо соблюдение очень многих условий, различных химических условий. Биохимик Антонио Ласкано следующим образом описывает эту проблему: «Чтобы создать РНК, вещества должны были преодолеть несколько серьезных препятствий, включая отсутствие простого, но при этом правдоподобного неорганического механизма формирования и накопления рибозы»^[74]. Возможное решение этой проблемы содержит гипотеза создания рибозы в условиях нынешних температур на основе минералов, обычных для пустыни.

Беннер пришел к выводу, что некоторые условия ранних этапов истории Земли могли создавать защитный щит для формирования нуклеиновых кислот, оберегая их от высоких температур и других разрушительных свойств природной среды. Беннер обнаружил, что при наличии боратов (это минералы, которые могут сформироваться только в сухих и жарких условиях, их используют для производства мыла) более простые органические молекулы, распространенные не только на Земле, но и в космосе, объединяются в сложные сахара, в том числе и рибозу!

Беннер обратился за подтверждениями этого предположения к существующим формам жизни. Он проанализировал стабильность различных бактерий и узнал, что самые древние из них по происхождению, возможно, появились при температуре 65 °С. Это значительно более высокая температура, чем в любом «теплом маленьком пруду», но она и гораздо ниже, чем в гидротермальном разломе, в котором температуры обычно измеряются сотнями градусов. На Земле ни сейчас, ни в древности было не очень много мест с такими температурами — за исключением пустынь.

Пустыня — среда преимущественно щелочная, с большим количеством карбоната кальция — единственное место, где возможны благоприятные условия для формирования рибозы на основе боратных соединений. Глинистые минералы различных видов также вполне обычны в таких местах, что повышает вероятность появления на основе глин образцов, способных поддержать синтез сложных органических соединений, необходимых для формирования жизни.

Для того чтобы борат сработал и появилась РНК, также необходимо, чтобы постоянно фильтровались и очищались жидкости через систему трубок, соединенных друг с другом.

Основываясь на работе Стива Беннера, Джо Киршвинк в сотрудничестве с профессором Массачусетского технологического института доктором Беном Вайссом попытался представить себе, какой могла быть естественная система для создания РНК на основе бората. Такой подходящей природной средой могло бы стать озеро Моно в Калифорнии, которое на самом деле является системой озер, расположенных на разной высоте над уровнем моря, с объединенным течением подземных вод. На древней Земле, особенно 4,2–3,8 млрд лет назад, такую систему могли образовать несколько метеоритных кратеров, соединенных в пустынной местности с общающимися водными ресурсами, перемещающимися с высоких уровней на низкие. В таком случае обеспечивались бы фильтрация и очищение. Однако появление подобной среды вряд ли было возможно 4 млрд лет назад, когда происходили

соответствующие химические процессы зарождения жизни. По всей вероятности, все минеральные породы на Земле возникли в водной среде. Заметим, что нет никаких свидетельств того, что суша появилась раньше чем 3 млрд лет назад. По нашим более-менее уверенным предположениям, во времена, когда формировалась жизнь, Земля почти полностью представляла собой сплошной океан, в лучшем случае, возможно, с цепочками островов. На Марсе, мы можем быть уверены, океанов не было — большие озера, возможно, небольшие моря. На Марсе могли быть подходящие пустыни, но едва ли на Земле 4 млрд лет назад. Возникает вопрос, как вообще жизнь могла оказаться на Земле?

Панспермия и Марс

Сегодня приблизительно 75 % поверхности Земли занимают крупные океанические бассейны и материковые массивы, возвышающиеся над средним уровнем моря. Вдоль континентальных разломов возникли новые гранитные породы, осадочные породы нанесены на несколько сотен километров и частично преобразовались в гранит. Таким образом, чем ниже мы погружаемся по геологической лестнице, тем больше воды и меньше суши мы встретим на Земле.

Есть и другие подтверждения этому. Из геологических моделей известно, что сразу после образования Луны около 4,567 млрд лет назад на нашу планету упало гигантское небесное тело, и вся Земля просто расплавилась. Возник океан расплавленной магмы как результат интенсивного теплового воздействия, а также сегрегации никеля и железа в глубине планеты. Первые полмиллиарда или даже более лет после этого события были временем сильнейших тепловых потоков параллельно с постепенным отвердеванием коры в самых верхних слоях земной литосферы. Такой повышенный уровень теплоты ограничивал поднятие твердых элементов относительно среднего уровня моря. Некий континент находился над морским дном просто потому, что «всплывал» над менее плотной субстанцией. При потоках теплоты высокой температуры корни материка таяли, и это не позволяло образовываться высоким горным цепям.

И наконец, геохимики подозревают, что уровень земных океанов со временем падает. После образования Земли, вероятно, большое количество водных паров в общепланетарной системе конденсировалось на поверхности молодой планеты и постепенно просочилось обратно в мантию в процессе плитотектонической деятельности. Этот «обратный» путь, безусловно, химически прослеживается в цирконах возрастом 4,4 млрд лет. Оценки уровня того первичного океана варьируются от почти равных сегодняшнему до превышающих сегодняшней уровень в 3–4 раза. Учитывая все эти обстоятельства, совершенно невероятно, чтобы около 3 млрд лет назад хоть какой-нибудь остров мог торчать над поверхностью воды, за исключением махонькой верхушки одинокого вулкана.

Водный мир — не лучшее место для образования рибозы. Кроме того, это ужасное место для формирования сложных молекул вроде белка и нуклеиновых кислот, которые выделяют некоторое количество воды всякий раз при добавлении очередного сегмента. По этой причине 3 млрд лет назад Земля не могла быть подходящим местом для первичной фазы возникновения жизни. Да и долго еще после этого едва ли существовали места вроде озер в Долине Смерти, богатых боратом кальция настолько, чтобы стабилизировать образование рибозы и прочих углеводов.

Многочисленные эксперименты, проведенные в последнее десятилетие, убедительно доказывают, что метеориты с поверхности Марса могут достигать поверхности Земли, избегая убивающего теплового воздействия, и таким образом могут переносить с собой и жизнь. За последние 4,5 млрд лет такое путешествие от Марса к Земле совершили различные тела общим весом более одного миллиарда тонн. Поэтому для осмысления источников происхождения жизни на Земле следует учитывать и возможность того, что сначала она появилась на Марсе, а затем была принесена на Землю метеоритами^[75].

Марс почти вдвое меньше Земли в диаметре, а его масса составляет лишь около 10 % от земной. Как меньшая планета, он имеет и меньшее гравитационное поле. Поэтому метеориту или молекуле газа очень легко полностью потерять связь с Марсом. По этой причине, когда какой-нибудь малый астероид сталкивается с Марсом, это приводит к тому, что с

марсианской поверхности большое количество материала улетучивается на орбиту вокруг Солнца, но при этом не испытывает воздействия сильного, «шокового» тепла, которое бы убило возможную жизнь. Напротив, чтобы покинуть поверхность Земли, требуется большое количество энергии из-за сильного притяжения, что приводит к почти полной вероятности расплавления таких вылетающих в космос объектов. Нет никаких свидетельств того, что с поверхности Земли что-то попало в космос естественным путем и сохранило бы форму и/или жизнь.

Поэтому, если бы жизнь и правда зародилась на Марсе, то он могла легко оттуда сбежать. С другой стороны, более сильная гравитация Земли означает более мощное удержание гидросферы и атмосферы, не повреждаемых за существенное геологическое время. Атмосферное давление на Марсе настолько мало, что жидкая вода закипает уже при комнатной температуре. Новые данные с последнего марсохода «Кьюриосити» в 2012 году ясно показали, что в марсианском кратере Гейл существовало озеро или, возможно, море, в которое впадал поток, имеющий веерное устье, а в нем когда-то весело бурлили и парили пузыри. Мир вулканических пород, насыщенный бурлящим парами и морями, с активным круговоротом воды, непременно должен был породить жизнь. Или наверняка *был способен* это сделать. Мы считаем, что именно там и появилась жизнь, которая теперь обитает на Земле.

При изучении слоев катархея становится очевидным, что 4,4 млрд лет назад океаны на Земле существовали. Возможность зарождения жизни в марсианских, насыщенных боратами и разноуровневыми озерами пустынях подтверждается теорией Беннера и подкрепляется исследованиями Киршвинка^[76]. Серия недавних экспериментов показывает, что на Землю с Марса могли переместиться сложные органические молекулы и даже микробы в состоянии спячки благодаря процессу, который назвали планетарной панспермией — крупные столкновения Марса с небесными объектами около 3,6 млрд лет назад вызвали падение на Землю потока метеоритов и таким образом произошло заселение нашей планеты марсианской жизнью, или марсианские химические вещества стимулировали возникновение жизни на Земле.

Существует еще один довод в пользу марсианской теории происхождения жизни, основанный на исследовании Дэвида Димера из Университета Калифорнии^[77]. Одной из самых больших проблем в создании РНК является необходимость объединения многих сегментов, называемых нуклеотидами РНК, в длинный «полимер». Димер показал, что замораживание раствора с нуклеотидами вызывает их объединение по краям кристаллов льда. На Земле в древности не было льда. Но на полюсах Марса его было много, особенно на ранних стадиях, когда Солнце было менее ярким.

Развитие наших представлений о том, как сформировалась из неживых соединений жизнь на Земле, во многом зависело от того, насколько успешно нам удавалось создавать жизнь в пробирке. Еще пять лет назад почти никак не удавалось. Но благодаря гарвардской группе ученых, возглавляемых Джеком Шостаком, мы теперь так близки к успеху, что общественность и представить себе не может^[78]. Шостак и его коллеги экспериментировали с РНК на протяжении почти двух десятилетий. На Земле первичной молекулой, несущей информацию, была РНК или что-то очень близкое к ней, что потом развилось в РНК в ее современном виде. Шостак с командой сделал великое открытие именно в этой области.

Фокус в том, чтобы заставить нуклеотиды соединиться друг с другом в цепочки РНК. Объединить их значительно легче, чем заставить размножаться после объединения. Однако они это сделают, если в цепочку объединятся 30 и более нуклеотидов, поскольку с такой или большей длиной молекула РНК приобретает совершенно новое свойство — она становится катализатором, химическим соединением, которое убыстряет реакцию. А в нашем случае речь идет ни о чем ином, как о реакции репродуцирования молекулы РНК в две идентичные копии.

Чтобы создать цепочку РНК, состоящую не менее чем из 30 нуклеотидов, на (или в) Земле потребовалась, возможно, глинистая порода в качестве заготовки. Подходящей представляется монтмориллонитовая глина. Согласно этой гипотезе, отдельные нуклеотиды, растворенные в жидкости, сталкивались с глиной. Они становились слабо связанными с глиной и больше не перемещались. В некоторых местах глинистой породы образовывались скопления из 30 и более нуклеотидов. Поскольку связи с глиной были слабы, происходило отделение цепочек, и если возникала какая-то концентрация этих цепочек, то они объединялись в некий пузырь с насыщенной липидами жидкостью, что служило первой протоклеткой.

Двумя необходимыми для жизни компонентами являются клетка, способная к воспроизведению, и некая молекула, способная нести в себе информацию, а также служить катализатором для реакции, которая иначе — без этой молекулы — не произойдет. Если в клетку попадает достаточно новых компонентов для РНК, каталитическое действие РНК приводит к появлению еще большего количества РНК уже в самой клетке. В более ранних представлениях клетки и информационные молекулы формировались отдельно друг от друга, а затем сливались. Теперь понятно, что они развивались в тандеме.

Многие биологи утверждают, что жизнь появилась по-простому, вот так: «голая» молекула РНК плавала в бульоне из нуклеотидов и самовоспроизводилась. Но, согласно более распространенной точке зрения, клетки и РНК появились как единое целое — клетки с двойными стенками из жиров и нуклеотидами РНК внутри росли, поглощая все больше жиров и нуклеотидов. Последние могли проникать внутрь сквозь жировые стенки клеток, но более крупные объединенные нуклеотиды уже не могли пройти обратно наружу. На древней Земле было много веществ, которые могли реагировать друг с другом и создавать жировые молекулы, которые в свою очередь с готовностью объединялись в листы, а затем и шары.

Благодаря своим химическим свойствам скопления жировых молекул при физическом волнении легко создают полые сферы, так же как вода на короткий миг формирует маленькие капли на своей поверхности. Эти полые шары наполняются молекулами, которые могут производить РНК, если эти молекулы (то есть нуклеотиды) есть в растворе. Вот тут-то факт концентрации особенно важен, поэтому и аналогию с «бульоном» используют так часто: должно было существовать очень много нуклеотидов, заключенных в стенки протоклетки,

чтобы возник шанс образования РНК. Если, конечно, у этой новой протоклетки не было такого свойства, которое позволило бы ей самой перемещать нуклеотиды из раствора внутрь себя.

Стенка клетки не только поглощала нуклеотиды. Она еще собирала все больше молекул-липидов и постепенно приобретала форму сосиски. В конце концов она расщеплялась, и появлялись две сферы, каждая — со своей долей РНК. И не только РНК, конечно, но и прочие молекулы, ведь чтобы существовать, клетке необходима энергия, которую могут вырабатывать другие внутриклеточные «машины»-молекулы. Таким образом, внутренняя среда клетки располагала множеством химических веществ, которые действовали определенным упорядоченным образом, чтобы обеспечить приток веществ внутрь клетки, ненужные молекулы выбрасывались наружу, а вокруг при этом должно было находиться множество молекул, пригодных для поглощения.

Вот на этом этапе и началась эволюция. Некоторые клетки могли размножаться быстрее, основываясь на качестве молекул, находящихся внутри. Таким образом возник естественный отбор, и завелся моторчик жизни в привычном для нас виде: клетки, которые автономны, имеют обмен веществ, воспроизводятся и эволюционируют. Все остальное, по знаменитому выражению Фрэнсиса Крика, стало историей.

Порог Дарвина

Первые земные клетки были как сборные домики, в которых все части изготавливаются в разных местах, как самостоятельные секции, а затем свозятся в одно место. Транспортными путями могли служить вода или воздух. «Работа» последнего в этом качестве получила серьезное подтверждение в исследованиях по изучению органического материала в верхних слоях атмосферы последних, начиная с 2010 года, лет.

Самые ранние формы жизни, возможно, имели очень пористое строение стенок клетки, что позволяло пропускать целые геномы — этот процесс известен как горизонтальный перенос генов. Но пришло время, когда клеточные системы от недолговечных перешли к постоянным. Это момент биолог Карл Вёзе назвал «порогом Дарвина». Это период, когда уже можно различать виды в том смысле, в каком они понимаются сегодня, и когда начался естественный отбор, иными словами, эволюция. Естественный отбор предпочитал функционально более усложненные клетки, с большим количеством внутренних связей, чем у их простых предшественников, и более сложные виды распространились, поглотив простые, составленные из «модульных секций».

Современная земная жизнь началась в тот момент, когда закончились радикальные изменения генов. Исследователи ранних этапов эволюции, такие как Вёзе, считают, что достижение этой стадии организации крайне важно для жизни за всю историю ее эволюции. Те первые клетки наверняка не были однообразными, вероятно, существовали целые экосистемы, наполненные протоклетками самых разных свойств, вирусами, и кто знает, что там было еще в этой процветающей экосистеме жизни и околожизни: РНК-белковые организмы, РНК-ДНК-организмы, ДНК-РНК-белковые создания, РНК-вирусы, ДНК-вирусы, липидные протоклетки, белковые протоклетки — *это было время самого большого разнообразия видов за всю историю Земли*, возможно, 3,9 или 4,0 млрд лет назад. Хотя, согласно новейшему подходу, это было скорее позже, чем раньше 3,9 млрд лет назад. Естественный отбор отдавал очко в пользу лишь одного из тысячи возможных живых вариантов.

Нобелевский лауреат Кристиан де Дюв утверждал, что как только все ингредиенты и нужное количество энергии объединились вместе на древней Земле, жизнь возникла из неживого материала очень быстро. Возможно, за минуты.

Глава 5

От происхождения до кислородного насыщения: 3,5–2 миллиарда лет назад

Северо-западная часть Австралии — один из самых малонаселенных регионов мира. Эта территория почти равна по площади западной части США — от Скалистых гор до тихоокеанского побережья, и представляет собой гигантскую безводную пустыню, в основном «ржавого» цвета. Именно там находится очень важное для понимания истории развития жизни на Земле место — здесь были обнаружены самые древние (на сегодняшний день) формы жизни. Пилбара (так называется это место) пустыня, в ее древних холмах содержится много окисленного железа. Эта темно-коричневая земля служит ложем для останков форм древнейшей земной жизни. Красные холмы Пилбары сформированы большими массивами железной руды, и поэтому здесь располагается большое горнодобывающее производство, которое оставляет открытые карьеры, проникая в самую глубь железозносных слоев. Затем руда в основном уходит в Китай — так быстро, как только могут загрузиться многочисленные суда.

Однако в Пилбаре есть не только железная руда. В этих безлесных местах существует множество скальных выходов, которые давно считаются хранилищем старейших окаменелостей, включая описанные в предыдущей главе. Кроме того, там — в местечке под названием Стрелли-Пул, не более 32 км от того места, которое описывал Скопф (см. главу 4), — совсем недавно обнаружили еще одного претендента на первенство в конкурсе за звание самого древнего ископаемого на Земле.

Не то чтобы все трубили о том, что там найдены окаменелости. Однако вся округа — неоспоримое свидетельство древней жизни, поскольку ландшафт богат строматолитами — это ископаемый карбонатный слой, который формировался на дне мелководного водоема и сейчас содержит останки бактериальных скоплений, которые были самым распространенным видом жизни на Земле с момента ее возникновения и до периода давностью полумиллиард лет. Забавно, что Западная Австралия, а именно угол залива Шарк, стала местом, где до сих пор вдали от атмосферы и кислорода живут потомки еще более ранней жизни. Вот такое стечение обстоятельств.

Сосуществование в одном и том же месте и древнейших ископаемых, и до сих пор живущих образцов того, какой была жизнь на заре времен, — все это делает Западную Австралию важнейшим «музеем» ранних этапов жизни на планете. Окаменелости первых жизненных форм относятся к периоду от возникновения жизни и до первого образования «Земли-снежка» в конце архейского эона, длительность которого составляет около одного миллиарда лет. Нам известно об этих формах жизни в основном по строматолитам и по очень редким, исключительным, случаям обнаружения окаменелостей в агатовых породах, называемых кремнистым известняком. Наряду с образцами из Западной Австралии строматолиты Южной Африки из района под названием зеленокаменный пояс Барбертон, что находится недалеко от знаменитого национального парка Крюгер, дают больше всего информации о природе древнейшей жизни Земли.

На протяжении почти всего XX века мы все полагали, что эти породы образованы как побочный продукт водорослевых матов, которые могли стимулировать бурное насыщение среды карбонатами за счет фотосинтеза. Но за последние два десятилетия многим исследователям Земли стало ясно, что некоторые (хотя не все!) слоистые породы могли

образоваться под непосредственным химическим воздействием соленой воды. Если принимать за факт то, что строматолиты сформировались в процессе деятельности живых организмов, то для подтверждения следует изучить современные образцы, хотя их на самом деле довольно мало. Лучшим местом для исследования современных строматолитов служит залив Шарк Западной Австралии. Там обнаружены большие, иногда до метра в ширину, намывы донных осадочных материалов (в основном из песка и ила), а под ними и сверху — колонии способных к фотосинтезу бактерий. Если распилить один из таких строматолитов, то на спиле можно увидеть упорядоченные наслоения, при этом обязательно с волнообразными элементами. Поверхность строматолитов в основном круглая, но срезы демонстрируют удивительное разнообразие форм и структур.

Строматолиты из залива Шарк долгое время славилась как лучший инструмент для познания архейского эона. Действительно, здесь мы видим униформизм в действии: структура, химия и биология этих видов, проживающих сегодня в жаркой Западной Австралии, являются широким окном в далекое прошлое, и их наличие как нельзя лучше помогает интерпретировать ископаемые строматолиты. Но есть кое-что в заливе Шарк, о чем вы не узнаете из многочисленных телепередач и статей об этом месте, которое определенно *не* является моделью архейских океанов. Принципиальным препятствием к отождествлению залива Шарк с архейским морем является природа других микроорганизмов, населяющих этот залив (а он большой, около 810 га) в районах образования строматолитов. Эти организмы тоже напоминают нам о том, какой была жизнь в первый миллиард лет своего существования.

Жизнь в архее и путь к кислороду

Около 2,5 млрд лет назад Земля подверглась огромным изменениям, настолько значительным, что это вписало новую эпоху в геохронологическую временную шкалу. Самым древним периодом является катархей, который начался с формированием самой Земли (4,567 млрд лет назад) и закончился с появлением первых окаменелостей около 4,2 млрд лет назад. Следом пришел архейский эон, жестокое время в истории планеты, который начался в период «тяжелой бомбардировки» и закончился приблизительно 2,5 млрд лет назад, с приходом протерозойской эры. Переход от архея к протерозою в общем совпадает с увеличением количества кислорода в атмосфере, а кислород этот произвели организмы, способные к фотосинтезу.

Фотосинтез — процесс, который жизнь использует для преобразования инертного углекислого газа в живую клеточную материю, таким образом заменяя «неорганический» углерод на то, что называется «органическим» углеродом. Есть доказательства того, что в период между 4,2 и 2,5 млрд лет назад в архее уже существовал некий фотосинтезирующий организм. Также очевидно, что развитие фотосинтеза началось после возникновения первичных жизненных форм. Первичные организмы, вероятно, использовали водород в соединениях, в которых он химически взаимодействовал с атомами серы, и тем самым производился важный с энергетической точки зрения (и для всей истории развития жизни) сероводород^[79]. Водород очень энергоемкий, потому-то люди и хотят научиться использовать его везде где только можно: от автомобилей до электростанций. Нам также известно, что архейские организмы, по-видимому, использовали те же основные необходимые элементы, что и жизнь сегодня: углерод, серу, кислород, водород и азот.

Мы сегодня располагаем некоторыми сведениями о том, каковы были океаны и атмосфера 3,5 млрд лет назад. Скорее всего, концентрация углекислого газа значительно превышала сегодняшней уровень. Атмосфера была насыщена водяными испарениями, а также метаном. Без тех архейских парниковых газов, водяных паров, метана и углекислоты на Земле вряд ли существовала бы жидкая вода. Было очень жарко, но во времена, когда Солнце являлось гораздо менее активным, планета, скорее, согревалась сама — благодаря парниковым газам, без которых атмосфера не смогла бы удержать тепло. Но это была атмосфера без кислорода.

Многое из того, что мы знаем о том, весьма продолжительном, архейском периоде, приходит благодаря изучению современных аналогичных природных условий. Среды с низким содержанием кислорода довольно редки в наших теперешних океанах, но намного чаще встречаются в современных небольших озерах. На самом деле, многие озера сегодня сильно расслоены и содержат тонкий кислородный слой (образованный взаимодействием с атмосферой), под которым лежат слои, в которых кислорода вовсе нет. Изучение микрожизни в таких слоях позволяет узнать, что представляли собой сообщества микроорганизмов в далеком прошлом. В современных озерах, как, видимо, и в древних архейских морях, одними из наиболее значимых для углеродного круговорота являются организмы, которые связаны с химией метана. Как упоминалось ранее, метан помогает удерживать тепло, отраженное от земной поверхности и стремящееся улетучиться обратно в космос^[80]. Некоторые бактерии могут расщеплять метан и использовать его в качестве пищи. Таким образом его употребляли многие ранние формы жизни, а это значит, что жизнь, едва сформировавшись, сразу переключилась на другой вид потребления энергии. Прямо как автомобили в своем развитии: сначала им нужен был пар, потом дизельное топливо, потом бензин (и дизельное топливо, и

бензин — углеродные соединения, несущие энергию, как и метан), а вскоре и водородное топливо. Только человечество обращается к водородному топливу в последнюю очередь, тогда как жизнь начинала именно с него.

Много информации о раннем этапе истории развития жизни на планете дают нам осадочные породы. Например, одной из особенностей архейских осадочных отложений является частое проявление в них яркоокрашенных красных слоев. Они называются полосчатыми железистыми формациями, или ПЖФ. Эти интересные осадочные породы не образовывались в земной коре в более или менее значительных объемах на протяжении последних 1,85 млрд лет, за исключением одного-двух периодов «Земли-снежка» в конце докембрия, о чем мы расскажем подробнее в следующей главе. У железистых формаций есть загадка, которую уже долго не могут разрешить: чтобы так широко распространиться тонким слоем, железу надо быть растворенным в воде, а это означает, что оно должно было иметь восстановленную форму, которая называется закись железа, она придает земле зеленоватый цвет. С другой стороны, чтобы высвободиться, железу необходимо иметь окисленную форму красного цвета, быть *оксидным железом*, которое просто оседает в воде в виде частиц, а не растворяется как сахар. Проблема в кислороде: закись железа постоянно реагирует со свободной молекулой O_2 и создает красную окисленную форму. Любое железо или железный минерал красного цвета показывает, что железо подвергалось этому химическому преобразованию, которое мы по-простому называем ржавчиной и которая почти всегда требует присутствия молекулы O_2 . Как же получалось, что кислородный уровень океанической воды, с одной стороны, был довольно низок, что приводило к существованию железа в растворимой форме, а с другой — достаточно высоким, чтобы создавать ржавчину? Этот вопрос уже очень давно ставит ученых в тупик.

Более 50 лет назад Престон Клауд, один из известнейших исследователей докембрийской палеобиологии из Университета Калифорнии, выдвинул гипотезу, что кислород, необходимый для окисления растворенного железа, особенно в океанах, происходил от деятельности фотосинтезирующих простейших, известных как синезеленые водоросли, цианобактерии (*Cyanobacteria*)^[81]. Это единственный на планете организм, который сам научился производить дающий жизнь фотосинтез — процесс расщепления молекулы воды и высвобождения атома кислорода, если описывать буквально. Некоторые из его потомков «поработаны» теперь другими организмами и служат нам всем как зеленые светоулавливающие органеллы в растениях и других водорослях. Сегодня каждое растение на Земле имеет крошечные «капсулы», эволюционировавшие из тех первых синезеленых водорослей, но теперь они — рабы «эндосимбиоза», выполняющие прихоти многоклеточных растений. Престон Клауд представил себе плавающий «кислородный оазис» таких первых крошечных фотосинтезаторов-цианобактерий, каждая из которых производила крошечное количество кислорода, и за сотни миллионов лет они кардинально изменили природу не только жизни на Земле, но и химию океанов, атмосферы и даже твердого покрова нашей планеты. С каждой новой порцией кислорода, выброшенного в архейский океан, маленькие частицы ржавчины оседали на дне, медленно, но неуклонно накапливаясь в полосчатые железистые формации.

Молекулярный кислород — одно из самых ядовитых соединений. Все, кто принимает антиоксиданты вместе с витаминами, знают, что они помогают избежать рака, возникновение которого обычно провоцируется кислородом, разрушающим деликатную клеточную химическую систему и в результате превращающим ее в убийцу-зомби. Антиоксиданты — не просто рекламный миф. Кислород в своем химическом неистовстве

разрушает клетки, преобразует, а зачастую и убивает их. Тогда как же организмы, которые производят такой яд, остаются в живых в момент выделения кислорода?

Здесь возникает классический вопрос о курице и яйце. Любая форма жизни, которая научилась выделять кислород, но при этом не обзавелась антиоксидантными ферментами, убила бы саму себя. Таким образом, сначала должна была развиться система контроля над кислородом. Но весь кислород в атмосфере производится фотосинтезом, то есть кислород не должен был появиться, пока эволюция не создала защитные механизмы от него! А значит, должен был существовать какой-то неорганический источник молекулярного кислорода, под воздействием которого первичные клетки выработали бы систему защиты против яда. Этот процесс подобен тому, в результате которого мы защищаем себя от смертельных болезней: в детстве подвергаемся их малому воздействию и тем самым даем нашему организму возможность постепенно создать защиту.

Так откуда же взялся этот ранний кислород для «вакцинации», если не из фотосинтеза? Очень сложно произвести кислород небиологическим путем. Реально работающий способ — это фотохимическая реакция под воздействием ультрафиолета, того самого, который вызывает солнечный ожог. Ультрафиолет, встречаясь с водой и углекислым газом в атмосфере, производит остаточный уровень O_2 и других соединений. Сегодня солнечное ультрафиолетовое излучение в основном блокируется озоновым слоем высоко в атмосфере, очень далеко над слоями, содержащими водяные пары (которые замерзают). Но в ранней истории планеты кислорода и, соответственно, озонового слоя не было, а значит, не было и защиты от ультрафиолета. Стало быть, очень сильное ультрафиолетовое излучение Солнца воздействовало на Землю и создавало небольшое количество молекул кислорода — недостаточное для дыхания, но вполне достаточное, чтобы жизнь на него отреагировала и эволюционировала в конце концов до форм, способных выживать при большом объеме кислорода.

Некоторые соображения геологической науки и кислородная катастрофа

Хотя все согласны с тем, что эволюция синезеленых водорослей была самым значительным биологическим событием на нашей планете (даже более значительным, чем развитие эукариотических клеток и появление многоклеточных организмов), мнения по поводу того, в какой именно период эта биологическая инновация имела место быть, существенно расходятся. Более 50 лет назад геологи выяснили, что некоторые из самых древних речных осадочных пород содержат округлые образцы обычного минерала — серного колчедана («золото дураков»), а также породы с содержанием очень малых объемов урана (этот минерал называется уранинит). Эти минералы крайне нестабильны при взаимодействии с кислородом (как и железо, они сразу образуют ржавчину), и их очень редко можно обнаружить в открытых, насыщенных кислородом океанах и почве, если только они полностью не изолированы от доступа воздуха из атмосферы. Это привело к первоначальному предположению, что в атмосфере кислорода почти не было вплоть до конца архейского эона, возможно, до периода, наступившего 2,5 млрд лет назад или даже позже. Большинство представителей геологического сообщества согласны, что в те времена концентрация кислорода в атмосфере была настолько мала, что и серный колчедан, и уранинит могли находиться на поверхности земли и в морях, не ржавея. Действительно, мы обнаруживаем в геологических слоях возрастом 2,5 млрд лет породы, в которых оба эти минерала встречаются в изобилии, и этот факт подтверждает, что в тот период истории количество кислорода и в воздухе, и в земле было ничтожно мало. А к периоду давностью 2,4 млрд лет оба минерала исчезают из пород, образовавшихся под водой и на поверхности суши. Означает ли это, что синезеленые водоросли появились только после периода, датированного 2,5–2,4 млрд лет назад? Для понимания истории развития жизни это вопрос чрезвычайной важности. Его решению пришлось посвятить многие и многие годы исследований.

Основной спорный момент заключался в следующем: появились ли синезеленые водоросли около 2,5 млрд лет назад или это произошло на миллиард лет раньше, около 3,4 млрд лет назад, а значит, приблизительно в тот момент, когда на Земле сформировалась жизнь вообще.

Бурная дискуссия о происхождении молекулярного кислорода в земной атмосфере сошла на нет после того, как был применен новый метод изучения истории планеты — сопоставление концентрации изотопов серы. Мы уже знаем (и еще вернемся к этой теме в главах, посвященных массовым вымираниям), что сравнение соединений углерода с изотопами углерода (учитывая, что изотоп — это атом, отличающийся от других количеством нейтронов в ядре) полезно для изучения жизни. Этот метод даже был использован для установления времени появления первой жизни на Земле. Дело в том, что живые клетки предпочитают легкие изотопы атомов одного и того же химического элемента (в нашем случае углерода, кислорода и, как вы сейчас убедитесь, серы). В обычных химических реакциях легкие изотопы продвигаются по этапам процесса быстрее тяжелых, поскольку они имеют ослабленные химические связи, которые создаются и разрушаются быстрее, что обуславливает более быстрое протекание реакции. Поэтому растения предпочитают наиболее легкие изотопы углерода и кислорода их тяжелым собратьям. В 2000 году Джеймс Фаркуар, Марк Тименс и их коллеги из Университета Калифорнии предложили новый метод, позволяющий узнать время появления определенных форм жизни, в основу

которого положено соотношение числа изотопов серы в породах, чей возраст установлен.

Фаркуар и Тименс проанализировали распределение изотопов серы в осадочных породах от архея до протерозоя, то есть в период 543–252 млн лет назад, и обнаружили, что распределение изотопов серы в породах старше 2,5 млрд лет сильно отличается от такового в более раннем периоде. Но при этом в породах моложе указанного возраста наблюдается сильное изменение относительной частотности изотопов серы, и это изменение могло быть связано лишь с недостатком ультрафиолетового излучения у поверхности Земли, а такое могло произойти только при условии формирования озонового слоя (первоначального по тем временам), а значит, у нас есть доказательства, что озоновый слой появился не ранее 2,35 млрд лет назад. На это также указывают и другие осадочные породы — индикаторы присутствия атмосферного кислорода.

Итак, кислород появился не ранее 2,4 млрд лет назад, по крайней мере, до того его было недостаточно для образования озонового слоя. А как же тогда быть с тем фактом, что в породах возрастом более 3 млрд лет найдены окаменелости синезеленых водорослей? Представляется, что водоросли развились раньше, но понадобился миллиард лет, чтобы на планете накопилось кислорода на целый озоновый слой. Долгое время нечто сдерживало распространение синезеленых водорослей, и этим нечто было железо — точнее, его малое количество.

Согласно модели Пола Фальковски и его учеников из Рутгерского университета, именно из-за малых концентраций железа синезеленые водоросли не могли с помощью кислорода быстро завоевать мир.

Синезеленые водоросли развивались в верхних слоях океанических вод, и кислород, который они вырабатывали, вступал в реакцию с железом, в результате возникали крошечные частички ржавчины, известные под названием «гематит» («кровоавик»). Такое название не случайно, поскольку и минерал красного цвета (цвета крови), и наша кровь насыщены железом. Эти частицы оседали на дно, образуя ПЖФ (см. выше «полосчатые железистые формации»). Но с уменьшением присутствия железа синезеленые водоросли не могли больше разрастаться. Таким образом, если выработка кислорода и биологическая продуктивность оказывались ниже уровня, необходимого для усиления процесса естественного окисления железа, то кислородный джинн находился в бутылке и не мог вырваться в атмосферу и воду. Но атомы железа постоянно поступали в океанскую воду за счет вулканической деятельности из разломов нашей все еще очень горячей в те времена планеты, и джинн, освободившись около 2,4 млрд лет назад, изменил наш мир. Сейчас нам известно, что планета побывала в двух основных устойчивых состояниях: одно — почти полностью бескислородное, даже несмотря на присутствие синезеленых водорослей, а второе — при наличии кислородной атмосферы, как сегодня.

Такая модель работает, только если океанская вода имеет «стратификацию», то есть поддерживает систему глубинных слоев. Океан, который постоянно перемешивается, вода с поверхности опускается ко дну, а затем снова возвращается к поверхности, будет постоянно насыщен ингредиентами для жизнедеятельности синезеленых водорослей. Их деятельность быстро перекроет геологическую «кислородную недостаточность»^[82], например, у дна океана, где вулканы постоянно выбрасывают неокисленное железо по сей день. Один из путей, которым можно преодолеть систему расслоения — глобальное оледенение. Это подводит нас к обсуждению еще одного важного события ранней истории Земли, в дальнейшем повлекшего за собой бурное насыщение атмосферы кислородом, — образования «Земли-снежка».

Во времена архея и раннего протерозоя случилось несколько оледенений,

предшествовавших кислородной катастрофе, включая три малых оледенения в период приблизительно 2,9–2,7 млрд лет назад. Но в период 2,45–2,35 млрд лет назад произошло кое-что намного более значительное, и это событие обусловило все изменения, необходимые для фиксации стратификации океанских слоев, и помешало фотосинтезирующим организмам разрастись в количествах, достаточных, чтобы насытить Землю кислородом. Событие это затормозило образование озонового слоя, не говоря уже о возникновении более крупных — многоклеточных — форм жизни.

За всю историю Земли приостановка стратификации океана возникала редко — лишь когда замерзали полюса. Обычно холодная вода на полюсах погружалась ко дну, вызывая перемешивание. Кроме того, сами по себе ледники также очень хороши в деле выветривания континентальных пород, которые под воздействием льдов превращаются в пыль и возвращаются обратно в океан. А там частицы железа, азота и фосфора (все, чем мы удобряем сегодня наши цветники) кормят синезеленые водоросли, а те быстро размножаются и производят все больше кислорода.

Благодаря мировому оледенению в период 2,45–2,35 млрд лет назад сопротивление сильной стратификации океана и обогащения воды «удобрениями» впервые было сломлено. Самое раннее и самое убедительное свидетельство того, что атмосфера была насыщена кислородом, пришло из крупных марганцевых залежей в Южной Африке, датированных возрастом 2,22 млрд лет. Такие минералы могли образоваться только при атмосфере, богатой кислородом, а значит, нам теперь наверняка известна самая ранняя дата существования мира фотосинтеза, озонового слоя и присутствия кислорода и в атмосфере, и в океане.

Первый период «Земли-снежка», название которому придумал Киршвинк^[83], возможно, длился около 100 млн лет^[84]. Замерзший океан, однако, не лучшее место для растений, живущих на поверхности, так что мощное насыщение кислородом не могло начаться, пока не был дан сигнал к таянию. Во времена «Земли-снежка» синезеленые водоросли выжили, вероятно, лишь в отдельных теплых источниках. Земле повезло, что она находится относительно близко от Солнца и в те времена было много активных вулканов, которые выбрасывали в атмосферу парниковые газы, что в конце концов позволило планете выйти из замороженного состояния. Иначе все было бы по-прежнему подо льдом и не было бы жидких океанов. Если бы Земля находилась хоть немного дальше от Солнца, углекислый газ превратился бы в сухой лед, жизнь на поверхности вымерла бы полностью, а возможно, вообще не появилась.

Причины оледенения представляются очевидными: возможно, 2,7 млрд лет назад появились первые фотосинтезирующие организмы, синезеленые водоросли, которые нуждались в углекислом газе, а разница температур воды в жидком и твердом состояниях была столь незначительна, что парниковый эффект пострадал из-за простого потребления углекислоты из атмосферы и воды. Иными словами, оледенение спровоцировала сама жизнь.

Земля со своей новой кислородной атмосферой была весьма странным местом, по крайней мере, для жизни и всего происходящего с ней в те далекие времена. Синезеленые водоросли продолжали выделять кислород, но не было организмов, которые бы им дышали. То есть аэробное дыхание, биохимический процесс, позволяющий нам потреблять кислород, могло развиваться только *после* появления кислорода. А значит, между появлением в атмосфере кислорода и появлением организмов, использующих его для дыхания, был временной промежуток. На самом деле эволюция с энтузиазмом приветствовала бы любой организм, который потребляет кислород, поскольку только молекула, содержащая кислород, как никакая другая способна так ускорять биохимические процессы и высвобождать так много энергии.

Временной разрыв между развитием кислородной атмосферы и появлением организмов, способных к кислородному дыханию, можно определить по геологическим отложениям. Синезеленые водоросли вдруг оказались в мире безо льда, поэтому быстро заполнили новые теплые верхние слои всех океанов 2,2 миллиарда лет назад площадь суши была в разы меньше, чем сейчас, так что синезеленые водоросли размножились в невероятных количествах, быстро увеличивая объемы кислорода. Они дрейфовали в мелководных морских экосистемах, куда легко проникал солнечный свет, и жили даже на поверхности суши. Поскольку эти организмы со страшной силой выделяли молекулярный кислород, значит они так же быстро потребляли и углекислый газ, который образовался в атмосфере во время «Земли-снежка», и, таким образом, океанские природные системы обогащались углеводородами. Сегодня такие легкие углеводороды поглощаются организмами, потребляющими кислород, и снова превращаются в углекислый газ. Возникает, впрочем, вопрос: что происходило с этими процветающими сообществами синезеленых водорослей, если тогда еще не существовало организмов, способных потреблять кислород? Ведь этих водорослей было так много, что это могло вызвать глобальные химические изменения на поверхности Земли, в атмосфере и океанах.

Углеводороды и кислород, смешиваясь на воздухе, образуют взрывоопасную смесь, и достаточно небольшой искры, чтобы запустить бурную реакцию, которую уже не остановить. Но углеводороды, растворенные в воде в виде небольших частиц, могут расщепляться только микроорганизмами. Без необходимого химического взаимодействия на Земле произошел бы серьезный сбой углеродного круговорота. В частности, при образовании большого количества углеводородов в атмосферу обязательно должно было попасть большое количество кислорода.

В действительности период геологической истории между 2,2 и 2,0 млрд лет назад показывает такой сильный дисбаланс соотношения углеродных изотопов, что геохимики даже дали этому времени особое название «Сдвиг», и это самый длительный подобный период во всей истории Земли. Наша планета, стало быть, была территорией кислорода, но без организмов, способных им дышать. Значительные сдвиги углеродного круговорота, вызванного деятельностью синезеленых водорослей, приводили к выделению углеродных соединений, которыми некому было питаться. Остаточные свидетельства накопления этих соединений можно найти в Карелии (Россия). Сегодня большая часть таких соединений, напоминающих нефть, поглощается и расщепляется живыми организмами, которые потребляют кислород. Это показывает, что в древности мир скорее захлебнулся в углеводородах, чем переработал их непосредственным образом. А в результате объемы кислорода увеличивались, пока его не стало столько, что атмосфера переполнилась им, и его давление в атмосфере повысилось. Если бы в те времена на планете существовали леса, было бы достаточно одной молнии, чтобы всю Землю охватил пожар, жар которого превысил бы все известные сегодня случаи больших лесных пожаров.

Этот неоднозначный эпизод в истории развития жизни закончился совершенно неожиданно, когда эволюция произвела первые организмы, которые действительно могли дышать кислородом. Для этого потребовалось появление специальных ферментов. Возник совершенно новый тип внутриклеточного строения, он существует и по сей день — органелла под названием митохондрия, основной источник энергии для клеток-эукариотов. Эти клетки крупнее, чем их предшественники прокариоты (бактерии), они наделены отдельными «комнатками» внутри всего их гигантского клеточного «дома». У митохондрии есть свой собственный маленький сегмент ДНК, принадлежащий ей со времен ее существования в качестве микроба, который научился самостоятельно дышать

кислородом, — то есть отдельной свободной бактерии. Но за последние 2 млрд лет она превратилась в «служанку». Интрига в том, что самой точной датой существования последнего общего предка всех эукариотов является период давностью около 1,9 млрд лет — именно тогда, возможно, и появились эукариоты и началось восстановление равновесия в мировом углеродном круговороте. По-видимому, биосфере понадобилось 200 млн лет эволюции, чтобы адекватно отреагировать на присутствие изначально ядовитого кислорода.

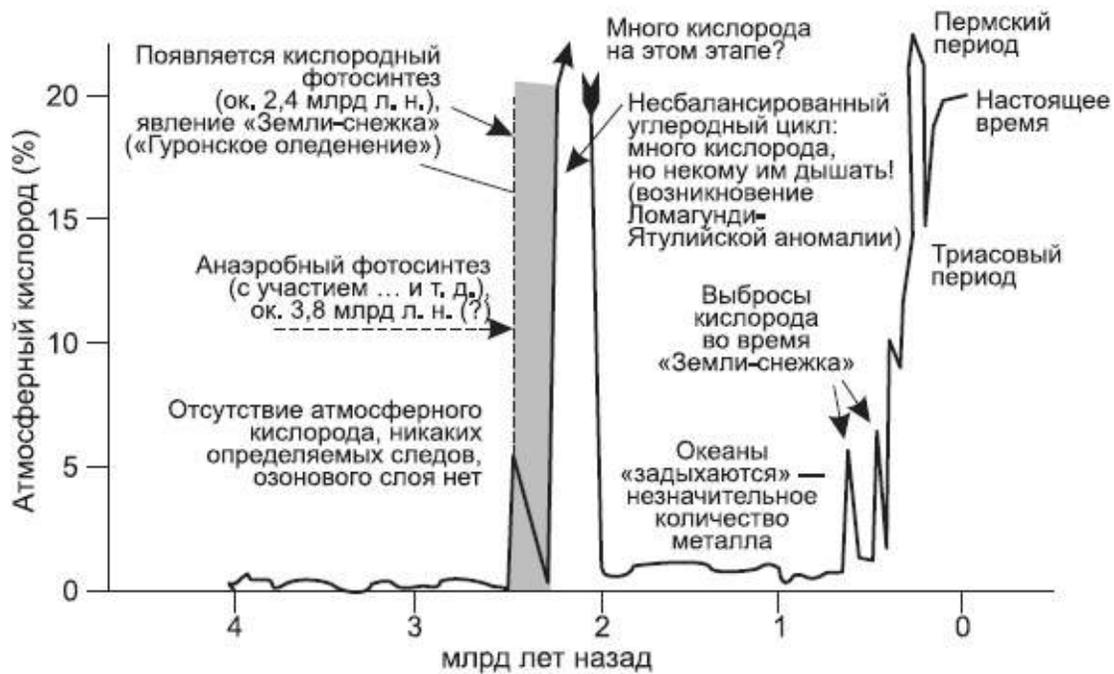
Глава 6

Долгий путь к появлению животных:

2–1 миллиард лет назад

Период между кислородной катастрофой (с кульминацией 2,3 млрд лет назад) и появлением первых элементарных многоклеточных назвали «скучное миллиардолетие» по той причине, что (предположительно) ничего существенного с биологической точки зрения не происходило. Словно история развития жизни решила передохнуть. Миллиард лет — довольно долгий срок для ничегонеделания. Однако, как это часто бывает, недавно обнаружилось, что не так уж и скучно было. Новые открытия свидетельствуют, что жизнь на месте не стояла. Напротив, этот долгий период начался со значительного насыщения атмосферы кислородом, а около 2 млрд лет назад произошло весьма значительное событие: появление эукариотической формы жизни — жизни нашего типа, с большой клеткой и ядром в ней. С одной стороны, большая часть разнообразных организмов такого нового типа нам хорошо знакома — это различные простейшие вроде амёбы, инфузории-туфельки, эвглены и т. п., но с другой — также имеются очень большие и странные окаменелости, в том числе самое необычное ископаемое из когда-либо найденных.

Многие специалисты разделяют точку зрения, согласно которой в период 2,2–1 млрд лет назад, вероятно, кислорода в атмосфере было недостаточно для поддержания жизни крупных животных^[85]. (Это, кстати, хороший момент для обобщения различий между животными, многоклеточными и простейшими. Все три типа являются эукариотами, то есть имеют крупные клетки с ядрами и другими органеллами, например, митохондриями. Но животные и многоклеточные — это одно и то же, они состоят более чем из одной клетки, если не считать момента оплодотворения. Простейшие же похожи на животных в своей способности к передвижению и относительно сложному поведению, но состоят только из одной клетки. Тем не менее они намного крупнее и сложнее бактерий). Но если с недостатком кислорода все понятно, то с причинами его возникновения все не так просто. Жизнь была способна к фотосинтезу, и жизнь обогатила мир кислородом, но все говорит о том, что самой жизни было гораздо меньше, чем должно было быть. Для животных необходимо, чтобы атмосфера была насыщена кислородом на 10 % и более (сегодня это 21 %), а «фотосинтезаторы» не выполняли свою работу. Ответ все-таки был найден: виновником оказался элемент, имя которого упоминается практически на каждой странице этой книги, — сера, в своей самой токсичной и в то же время жизненно необходимой форме — сероводород, молекула жизни и смерти. В статье 2009 года, опубликованной в материалах Национальной академии наук, палеонтолог Энди Нолл и его коллеги продемонстрировали^[86], что уровни кислорода *обязательно* должны были превысить известный для того времени уровень, но этого не происходило. Что-то препятствовало этому. Длинный перерыв между появлением одноклеточных организмов в период кислородной катастрофы 2,3 млрд лет назад и возникновением более крупных многоклеточных форм был на самом деле.



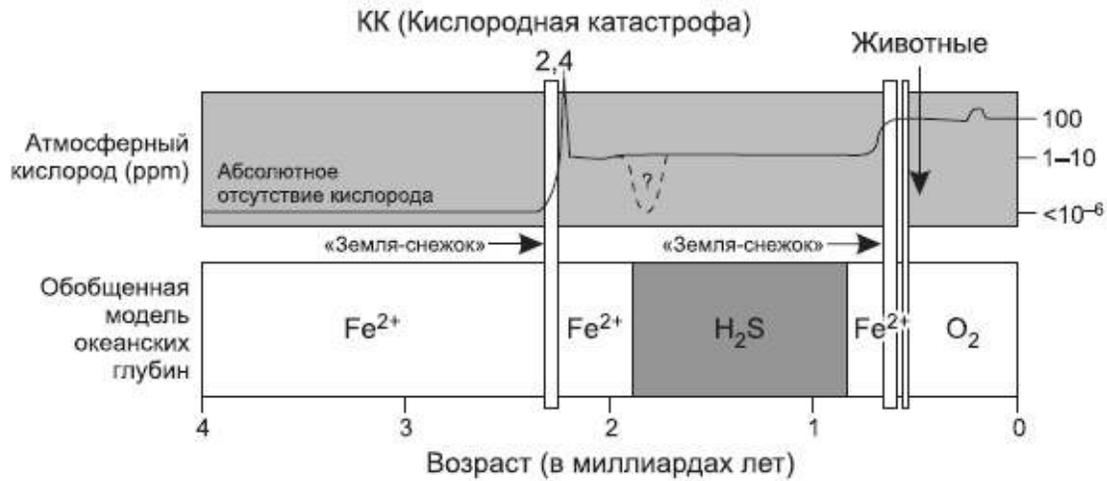
Наша новая модель увеличения концентрации атмосферного кислорода и некоторых сопутствующих событий.

Ничего грандиозного и сложного в тот период не происходило, и причина тому — сверхизобилие одноклеточных бактерий, которые использовали серу и составили конкуренцию растениеподобным бактериям с фотосинтезом, расщеплявшим воду на два элемента, но при этом не использовавшим серу ни на одном из этапов данного процесса. Таким образом, два очень разных типа живых организмов соперничали друг с другом за ресурсы, необходимые любой жизни: пространство и пищу. Поглощающие серу микробы, названные зелеными и пурпурными серными бактериями, все еще существуют сегодня, но только в самой ядовитой среде — неглубоких озерах и морских областях, где нет кислорода, но при этом достаточно мелководных, чтобы солнечный свет проникал к ним для фотосинтеза. Правда, в результате такого фотосинтеза кислород не возникает, потому что в ходе процесса не расщепляется вода.

Почти на всем протяжении скучного миллиардолетия океаны имели хорошо выраженное расслоение. Верхний слой был чист и насыщен кислородом, его занимали одноклеточные зеленые растения, которые поглощали солнечный свет и использовали его для своего развития, попутно выделяя кислород. Но под ними, возможно начиная с глубины 3–3,5 м и до самого дна, находились совершенно иные слои морской воды. Такая морская вода в своих верхних слоях приобрела пурпурный цвет благодаря огромному множеству пурпурных серных бактерий. Вода, в которой они обитали, насыщенная токсичным сероводородом, была бы смертельно ядовита для большинства сегодняшних живых организмов. Даже мертвые, эти бактерии могли воровать кислород из атмосферы (неосознанно, конечно, хотя некоторые микробиологи верят, что микробы всегда были хитрящими типами). После смерти их крошечные тела погружались на дно, а может, даже оставались в толще воды, соленой или наполненной осадочными частицами, и, разлагаясь, забирали драгоценные молекулы кислорода из верхнего слоя над ними. Драгоценные молекулы кислорода, предназначенные для атмосферы или чистого океана, расходовались при гниении пурпурных тварей.

Хотя и не много, но на Земле еще существуют места с выраженной стратификацией. Одним из наиболее известных является остров Палау в Микронезии, где находятся знаменитые озера медуз. Здесь в больших водоемах с чистой, насыщенной кислородом водой

изячно передвигаются многочисленные медузы. Но буквально в нескольких метрах под этим кристально чистым кислородным слоем находится и другой — темный, полный крайне опасных существ. В нем мало или вовсе нет кислорода, но есть избыток сероводорода. Он темно-пурпурного цвета, населен огромным количеством пурпурных серных бактерий, которые еще в древности делали мир небезопасным для любого, кому было нужно много кислорода, — таким существам в те времена уж точно не было скучно.



Наша пересмотренная модель содержания кислорода в воздухе и в воде.

Серные бактерии и их жизненные потребности в конечном итоге оказались вытеснены на задворки нашей планеты. Но они всегда где-то рядом, всегда наготове, чтобы вернуть себе пространство, которое потеряли, когда в мир вырвался кислород в больших количествах — около 600 млн лет назад. Они — как Империя Зла: и в девонском, и в пермском, и в триасовом, и в юрском, и в середине мелового периодов эта Империя наносила ответные удары, о чем мы поговорим в следующих главах.

Так или иначе, а превосходство серных фотосинтезирующих форм над кислородными было преодолено, этому способствовало поступление в океанскую воду новых больших объемов железа, которое выветривалось из близлежащих и растущих материков. Железо в морской воде вступало в реакции с различными формами серы, превращаясь в тяжелые плотные массивы серного колчедана, и количество серы в системе, таким образом, сокращалось. Это привело к голоду в среде серных бактерий, поскольку без того элемента они обойтись не могли. 600 млн лет назад кислород серьезно укрепил свои позиции, возможно, его количество даже резко возросло, когда был преодолен какой-то критический барьер. А вскоре после этого появились животные. В конце концов не так уж много времени понадобилось для их развития, как только на Земле закончилось адское время огня и серы.

Странные первые многоклеточные

Большая часть живых организмов не такого уж скучного миллиардолетия появилась на основе строматолитов, чемпионов по выживанию на самых долгих временных дистанциях, — они появились 2,2 млрд лет назад, продолжали развиваться и дали начало новым странным формам жизни. Выглядят они как тонкая черная спираль, но уж точно не микроскопическая, и называются *Grypania* (*Grypania spiralis*). Появление этих организмов означает, что жизнь сделала большой скачок — развила способность существовать «колониями» клеток, которые сцепляются вместе и обретают общие мембраны. Это были первые многоклеточные формы.

Grypania известны давно. Но в 2010 году наше понимание вещей изменилось с открытием необычных окаменелостей в Габоне (Центральная Африка)^[87]. *Grypania*, возможно, были колониями прокариотов (в данном случае бактерий), а новые ископаемые (которые, кстати, все еще не получили названия) — на вид крупные и слишком усложненные. Какими бы они ни были, мы знаем точно, чем они *не* являются. *Они точно не являются первыми животными.*

Первые настоящие животные намного моложе, чем *Grypania* и им подобные. Животным менее миллиарда лет. Впрочем, дату появления первого животного все еще относят к более ранним временам, руководствуясь передовыми методами определения возраста свидетельств их существования — известно о пока еще не идентифицированных ископаемых останках животных значительно старше 600 млн лет. Те, кто изучает молекулярный состав сохранившихся таксонометрических типов, полагают, что их метод «молекулярные часы» позволяет определить возраст останков животных в 700 млн лет. Но это не такая уж большая разница во времени с точки зрения всей эпохи существования жизни на Земле. Известно большое количество типов *многоклеточных* организмов, включая немало разнообразие прокариотических форм, и нет сомнений, что изобретение эволюцией организмов, состоящих более чем из одной клетки, приходится на период давностью более чем 2 млрд лет. Однако в большинстве случаев такие многоклеточные прокариоты состоят лишь из двух клеток, и ни один из таких организмов невозможно принять за животное.

Слизистая плесень многоклеточна, как и некоторые синезеленые водоросли. Впрочем, в каком-то отношении они — тупиковые ветви эволюции (но только не слизистая плесень — эта группа в конечном итоге тоже кое-чему дала жизнь). Эти слизистые формы существуют на планете несколько миллиардов лет и оказались весьма консервативны в эволюционном отношении. Усложненные многоклеточные растения появились более миллиарда лет назад и выглядели, скорее всего, как зеленые, бурые и красные водоросли, которые нынче можно увидеть на любом побережье, в тех местах, куда активно проникает солнечный свет. А животные все же значительно моложе.

Вероятно, размер организмов определенным образом связан с появлением кислорода в атмосфере. Кислород способствовал возникновению экземпляров более крупных размеров, чем те, которые существовали в докислородный период, и биологическая адаптация, усиливая скорость и/или объем поглощения кислорода, привела к гигантизму^[88]. Яркие примеры этому найдете в последующих главах, в которых будет продемонстрировано, как появление нового вида более эффективных легких и устройства всей дыхательной системы породило огромных динозавров.

Окаменелости настоящих животных встречаются в отложениях возрастом не старше 600 млн лет, и сразу — в большом изобилии. Возможно, они даже старше, и в пользу этого

свидетельствуют два доказательства. Во-первых, данные, полученные в результате применения метода «молекулярные часы», показывают, что многоклеточные эукариоты (что включает как растения, так и животных) на 100 млн лет старше их реальных окаменелостей, что определяет их возраст в 700 млн лет. Во-вторых, приблизительно этим же временем датируются ископаемые свидетельства деятельности животных — их следов или пищевых действий, то есть следов жизнедеятельности, — хотя окаменелостей самих тел в осадочных породах не обнаружено. В те времена уровень кислорода был близок к современному, хотя еще не сравнялся с ним. Не только свободный кислород, но и озоновый слой достиг относительно высоких показателей, и, таким образом, степень воздействия ультрафиолета и других излучений существенно снизилась.

Любопытные организмы, известные как акритархи (Acritarchs)

В любом разговоре о докембрийских формах жизни акритархам уделяется значительное внимание. На планете они появились очень рано: самым древним, по-видимому, 3,2 млрд лет, и продолжили свое существование до возникновения животных. К акритархам относят множество совершенно различных не только видов, но даже представителей разных царств и надцарств, и потому их называют мусорным ведром биологической классификации. Это показывает, как мало мы знаем о развитии жизни до того временного периода, которым датируется широкое распространение ископаемых останков животных и высших растений.

Акритархи являются одними из самых древних известных многоклеточных, они появились впервые в глубине времен около 2 млрд лет назад, при этом их окаменелости относительно редки. Но со второй половины протерозоя, около миллиарда лет назад, начинается их большое многообразие: в размерах, количестве и морфологической усложненности форм. Усложненность в основном отмечается в увеличении числа шипов, выступающих из их маленьких круглых тел. В период с 1 млрд до 750 млн лет назад акритархи были весьма распространены, а затем начался криогений, принесший огромные глобальные изменения, соответствующие его названию от греческого *cryo*, — все правильно, мир замерз. В результате протерозойских периодов «Земли-снежка» в океане должно было произойти массовое вымирание, а возможно, и на суше. Популяции акритархов в эти периоды глобального снега и льда резко сократились, но во время кембрийского взрыва они снова возродились, и их виды достигли пика своего процветания и разнообразия в палеозое.

Такое богатство шипов и колючек у акритархов, зародившееся миллиард лет назад, но продолжавшееся и в кембрийский период, объясняется несколькими причинами. Во-первых, шипы на маленьком круглом тельце увеличивают площадь поверхности и объем, это позволяет маленькому организму оставаться на плаву в толще океана, а не опускаться на дно, где его ждет погребение под различными осаждающимися частицами, что является обычной картиной морского дна. Многочисленные планктонные виды используют этот метод и сегодня. Вторым назначением шипов является защита от хищников. Возможно, в океанах миллиард лет назад таилось целое полчище плотоядных (или, по отношению к акритархам, технически — травоядных. Впрочем, если тебя съели, то уже не важно, кто именно тебя съел).

Окончание скучного миллиардолетия

Вот картина морского дна на мелководье около миллиарда лет назад: в волнах колышутся бурые и зеленые водоросли, скопления микроорганизмов переливаются всеми цветами радуги, покрывая все солнечные поверхности дна легкой многоцветной вуалью^[89]. Большими и малыми куполами и холмами над этой вуалью возвышаются строматолиты. Вода кишит жизнью, одноклеточной и многоклеточной, но на планете нет ни одного животного. Однако генетические и атмосферные часы продолжают тикать, отмеряя время до начала ледяной катастрофы.

В океанах миллиард лет назад жизнь просто бурлила, тогда как на суше, возможно, она делала лишь первые шаги: всегда деятельные микроорганизмы осваивали первые пруды и болота. В конце концов они заполнили и все влажные места, доступные солнечным лучам и клубам принесенной ветром пыли, достаточно богатой фосфатами и нитратами, чтобы эти малюсенькие одноклеточные микробы разрослись и покрыли все пригодные участки. Жизнь с энтузиазмом колонизировала сушу. И в этом энтузиазме чуть не уничтожила саму себя.

Глава 7

Криогений и эволюция животных: 850–635 миллионов лет назад

Как это уже было в период 2,5–2,4 млрд лет назад, около 750 млн лет назад на Земле похолодало. Причем похолодало настолько сильно, что, как и в конце архейского эона, океаны начали замерзать, сначала с полюсов, а затем все ближе к экватору, пока весь Мировой океан не оказался подо льдом. Земля вновь стала «снежком». В первый раз такое событие привело к настоящей революции в истории жизни на планете при поддержке насыщенной кислородом атмосферы. И в этот раз протерозойские «снежки» (их на самом деле было несколько) были отмечены не менее важным явлением. Нет, не появлением кислорода — появлением животных. И снова не без опасности для всей жизни на планете. Снова жизнь балансировала на грани смерти и самой себя.

Как было рассказано в предыдущей главе, первая «Земля-снежок» (период начался менее чем 2,5 млрд лет назад) возникла в результате деятельности присутствовавших форм жизни: увеличение количества фотосинтезирующих микроорганизмов привело к ослаблению парникового эффекта из-за уменьшения количества углекислоты в атмосфере. Начало второй серии «снежков» совпадает с началом криогения — одного из геологических периодов в долгой истории Земли (о нем мы упоминали в главе 1).

Оба периода «снежков» (каждый состоял из смен замерзания океана и последующего таяния) привели к мощнейшему ослаблению морской органики, поскольку лед блокировал солнечный свет. Таким образом, объем жизни на Земле (измеряется общей массой, называемой «биомасса») уменьшился до самых незначительных показателей по сравнению с периодами до и после «снежков».

Последовательность оледенений и последующих потеплений в совокупности с ослаблением/усилением парникового эффекта в периоды 2,5–2,4 млрд лет назад и 750–625 млн лет назад должна была стать серьезным фильтром в эволюции жизни. Некоторую информацию об этих периодах дают окаменелости, в качестве свидетелей всегда присутствуют акритархи (планктонные организмы, описанные в предыдущей главе), которые то процветали, то почти полностью исчезали.

Известно, что многие организмы реагируют на стрессовые ситуации окружающей среды значительной реорганизацией генома, а любой период «снежка» был более чем стрессовым. Эволюционная значимость таких геномных изменений является предметом горячих обсуждений в области молекулярной биологии. Разнообразные ископаемые останки указывают на появление более сложных организмов всякий раз после очередного периода «снежка», и этот факт подтверждает мысль, что «снежки» создавали эдакую эволюционную катапульту для запуска больших изменений в развитии сложных и разнообразных форм жизни.

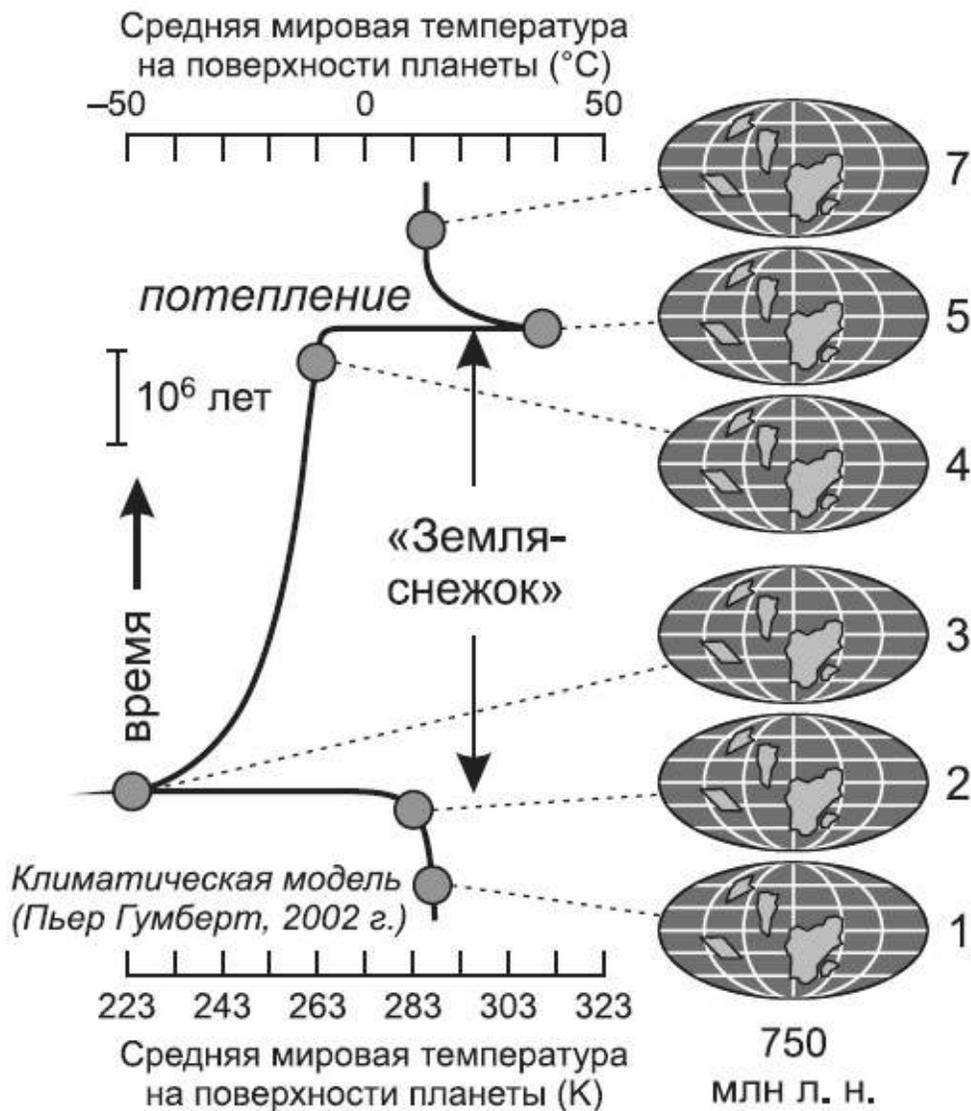


Диаграмма показывает подъемы и спады температуры в периоды под общим названием «Земля-снежок».

Один из наиболее глубоких вопросов относительно периодов «Земли-снежка» — вопрос об их происхождении. В предыдущей главе мы отмечали, что первые (архейские) «снежки», возможно, были спровоцированы бурной деятельностью самих живых организмов, а именно появлением фотосинтеза, который привел к уменьшению парникового углекислого газа. Но для возникновения второго периода «снежков» могли быть совершенно другие причины, возникшие почти через миллиард лет после первых оледенений. Вторая серия «снежков» могла начаться из-за тектонической активности материков того времени^[90].

Неопротерозойские оледенения (как и архейская первая серия, она характеризовалась множеством сменяющихся замерзаний/таяний) произошли спустя около 40 млн лет после того, как суперконтинент *Родиния*, образовавшийся из-за великого материкового слияния, начал распадаться.

Суперконтиненты обладали засушливым климатом, потому что большая часть суши находилась вдали от океанов. Напротив, когда континенты, а особенно суперконтиненты дробятся, сухие климатические регионы обретают морской климат и создают широкие возможности для повышенного химического выветривания. Химическое выветривание кремниевых пород приводит к быстрому падению уровня углекислого газа в атмосфере. С уменьшением количества CO₂ снижается и температура. Возможно, во второй раз «снежки» образовались не из-за жизни, а под воздействием неорганических химических процессов.

Но все могло быть и несколько иначе. Если будет установлено, что в те времена по всему миру быстро и неожиданно распространился какой-либо новый вид растений, то снова придется признать, что падение уровня углекислоты было вызвано фотосинтезом, а не химическим выветриванием. Это вполне может оказаться правдой: новейшие исследования истории развития жизни показывают, что примерно 750 млн лет назад появились сухопутные растения, все еще одноклеточные, но распространенные предположительно на больших пространствах планеты. Это могло бы многое объяснить.

Жизнь в эдиакарский период

Земля освободилась от снега и льда более 600 млн лет назад, и то, как она выглядела в тот период, очень сильно отличается от ее нынешнего внешнего вида. Но разнообразные силы — как эволюция, так и физика — постепенно сделали ее к позднему протерозою более-менее похожей на сегодняшнюю планету. Океаны кишели жизнью, все еще одноклеточной в основном, но уже во многом усложненной — вроде амёб, инфузорий-туфельек, а также загадочных полурастений-полуживотных типа многоклеточных вольвоксов или одноклеточных эвглен. Побережья и морское дно были покрыты различными типами бурых и красных водорослей, все еще распространенными на Земле. Все было готово для появления первых животных. Около 600 млн лет назад этот процесс начался — так мы, по крайней мере, думаем. Эдиакарий, лишь недавно выделенный, является периодом, который непосредственно предшествует палеозойской эре. Он начался 600 млн лет назад и закончился появлением существ, которые точно были животными. Этот временной интервал назван по имени своих самых важных обитателей, самых сложных на тот момент организмов, — мы называем их *вендобионты*^{[91][92]}.

Эти хрестоматийные окаменелости позднего протерозоя, непосредственным образом переходящего в кембрий, демонстрируют огромное разнообразие любопытных форм, непохожих ни на каких из ныне живущих. Сначала их обнаружили на Эдиакарской возвышенности в Южной Австралии, а теперь находят практически во всех уголках Земли.



Эдиакарская возвышенность — это часть более крупного хребта Флиндерса в Южной Австралии. Подобно многим другим далеким от зеленых побережий местам в Австралии, хребет Флиндерс это песок, скалистые насыпи и редкая растительность, приспособленная к засушливой среде. Наряду с канадскими сланцами Бёрджесс, германскими известняками Зольнхофен и формацией Хелл-Крик в Северной Америке этот австралийский пейзаж знаменит в мире находками окаменелостей. Эти холмы и подобные им того же возраста (около 560–540 млн лет) хранят отпечатки первых тел настоящих животных — с этой точкой зрения солидарны все палеонтологи.

Это открытие было сделано геологом Реджинальдом Сприггом^[93] во время осмотра

старых шахт на Эдиакарской возвышенности. Спригг, будучи геологом на государственной службе штата Южная Австралия, должен был оценить возможности разработки минеральных ресурсов в этом регионе и определить, имеет ли смысл развивать здесь горнодобывающую отрасль. Однако Спригг, страстный коллекционер-любитель всевозможных окаменелостей во времена студенческой юности, смог распознать в случайно найденных им кусках грубого песчаника, разбросанных в изобилии по всем холмам, следы какой-то жизни.

Спригг держал в руках нечто, напоминающее изображение медузы. Однако он понимал, что это не могла быть медуза по определению. Слои были весьма древними, и Спригг сделал верное предположение: странные ископаемые должны относиться к древнейшим из известных окаменелостей животных — так он выразился, когда через год после первой находки впервые объявил о них. Также в своем первом заявлении Спригг заявил, что окаменелости, по-видимому, принадлежат животным разных родов^[94].

Спустя некоторое время Спригг совместно с профессором Дугласом Мосоном и его студентами из Университета Аделаиды собрал еще несколько образцов необычных фоссилий. В том же месте, где были найдены первые окаменелости, обнаружилось еще больше образцов, и в 1949 году Спригг выпустил полный отчет о своем открытии, в котором содержалось подробное описание любопытных фоссилий^[95]. Все образцы, которые он описал, происходили из кварцитов. Паунд — геологической формации, возраст которой никак не удавалось достоверно определить: будь это кембрийский период, то он вряд ли бы представлял интерес, но если протерозойский, то странные ископаемые отпечатки оказались бы самым древним свидетельством существования животных на Земле.

В результате тщательного анализа было установлено, что эти окаменелости не похожи ни на одно из ныне живущих существ. Но наиболее таинственной была сама природа отпечатков. Во-первых, организмы, не имеющие твердых частей, очень редко оставляют отпечатки. Если все же это происходит, то только в мелкозернистых породах типа глинистых сланцев, в осадочных слоях, образованных на дне тихих стоячих вод. Но существа Спригга, очевидно лишенные скелета, сохранились в песчанике, а не в мелкозернистой породе.

Чтобы определить, было ли вообще возможно такое окаменение животных, похожих на современных медуз, актиний или морских перьев, провели ряд экспериментов. Одним из исследователей был Мартин Глесснер^[96], австралийский геолог и автор книги *The Dawn of Animal Life: a bio historical study* («Появление животных: биолого-историческое исследование»). Он описал серию экспериментов, в которых использовались очень большие медузы, помещенные на тонкий слой песка. Он отметил, что медузы действительно образуют отложения там, где это позволяют условия среды. Ископаемые, описанные Сприггом, теоретически не могли образовать окаменелостей.

Гранулы песка образуют отложения в местах с относительно высокой энергетикой. Песчаники находят сегодня у морских побережий, в реках, в песчаных дюнах — везде, где эти более-менее тяжелые гранулы могли бы перемещаться водой. В таких местах более мелкозернистые глины или тина никогда не образуют отложений, поскольку они слишком легкие и не задерживаются в проточной воде, а перемещаются в какие-нибудь более далекие места. Однако эдиакарские окаменелости и большие, и многочисленные, и находятся в песчаниках.

Чтобы глубже проработать эту проблему, летом 1987 года Питер Уорд пригласил студентов-палеонтологов Вашингтонского университета в лаборатории на островах Сан-Хуан в штате Вашингтон, чтобы поучаствовать в воссоздании условий, при которых могли формироваться эдиакарские ископаемые. Было проведено несколько видов экспериментов. В морских водах вокруг островов Сан-Хуан обитают разнообразные и многочисленные

кишечнополостные организмы — таксономическая группа, очевидно наиболее близкая к формам эдиакарских отложений. Для имитации мелководного морского дна возрастом 600 млн лет большие резервуары различной площади наполнили песком и затем залили морской водой. Эксперименты походили на ранее проведенные Глесснером, но в данном случае использовались более крупные организмы, и, кроме медуз, брали и других представителей типа.

Тела недавно умерших морских перьев, актиний и крупных медуз помещали на песок. Поверх тел животных укладывали слой песка, и всю систему оставляли в таком состоянии на некоторое время, а через несколько дней верхний слой удаляли. Ни один из этих экспериментов не продемонстрировал остаточных следов на песке.

В конце концов один из студентов предложил довольно оригинальную идею. На плотный песок сверху клали кусок легкой капроновой сетки от нейлоновых чулок, а затем на сетку аккуратно помещали очень большую медузу. Сверху все это покрывалось тонким слоем более легкого песка, а потом этот «бутерброд» заливали морской водой. Через несколько недель, когда сняли верхний слой песка и убрали нейлоновую сетку (мягкие части мертвого животного к тому времени уже полностью разложились), оказалось, что под чулком осталось прекрасное изображение организма, который лежал там сверху, включая детально отпечатывающуюся структуру строения внутренних органов.

Возможно, эти эксперименты ничего не значат. Но что, если в древние времена песок был покрыт чем-либо, похожим по толщине и фактуре на нейлоновый чулок, и поэтому не перемещался под действием малейшего движения воды? Мы представляем, что морские мелководья были покрыты тонкой пленкой, или несколькими пленками, микроорганизмов. Хотя они были очень хрупкими и легко разрушались штормами, эти покрывала удерживали осадочные частицы и таким образом сохраняли отпечатки мягкотелых животных, которые лежали на них после своей смерти, медленно покрываясь слоями песка, а это позволяло оздоровить среду для следующих поколений организмов.

На планете больше нет таких природных условий, в которых могли бы сохраняться отпечатки существ, лишенных скелета. Появление организмов, которые свободно передвигаются, привело к тому, что живые покрывала просто съедают. Нечто похожее произошло и со строматолитами после появления травоядных.

Мировая эдиакарская фауна

Сегодня известно около 30 мест на шести континентах, где была найдена вендская биота. Обнаруженные представители этой фауны относятся к 70 различным видам, и все они жили не позднее неопротерозоя^[97] (хотя есть предположения, что некоторые из них захватили ранний кембрий). Предполагается, что эдиакарские организмы достигли пика своей эволюции 575 млн лет назад в результате авалонского взрыва (назван по аналогии с кембрийским взрывом). Это произошло приблизительно через 50 млн лет после последних серий протерозойских «снежков».

По всей видимости, в те времена процветали целые сообщества таких организмов. Затем, 550–540 млн лет назад, вендобиота неожиданно исчезает из ископаемых летописей. На это время приходится появление косвенных свидетельств того, что животные приобрели способность к передвижению. Следы передвижения и пищевой деятельности присутствуют в осадочных породах. Так, большая и разнообразная группа животных исчезла как раз в тот момент, когда стали развиваться другие живые организмы (кембрийский взрыв)^[98]. Это исчезновение является первым массовым вымиранием, зафиксированным в ископаемых отпечатках, хотя, разумеется, и не самым первым массовым вымиранием на Земле в принципе. Очевидно, что найденные впервые в Австралии представители эдиакарской (вендской) биоты были распространены по всей планете.

Существует множество еще не получивших подтверждения предположений по поводу того, как происходил энергообмен в сообществах вендской биоты^[99]. В современных экосистемах основу пищевой цепи формируют фотосинтезирующие растения, которыми кормятся несколько уровней организмов, а те в свою очередь становятся добычей нескольких уровней хищников. Биомасса каждого из этих уровней составляет лишь 10 % от более низкого уровня пищевой цепочки. Вендобиоты демонстрировали совершенно иное устройство. Не было обнаружено каких-либо челюстей или признаков хищничества, хотя ближайшие родственники большинства эдиакарских организмов относятся к стрекающему типу, а они все хищники! Предположительно представители биоты имели симбиоз с множествами микроскопических водорослей (*dinoflagellates* — панцирножгутиковые), как это происходит у современных кораллов. Но доказательств этому нет. Поскольку, как кажется, в мире того периода не было хищников, его поэтически называют «эдиакарским садом», ведь он был последним моментом в истории Земли, когда относительно большие многоклеточные животные жили, не боясь нападения. К периоду, датируемому 540 млн лет назад, этот «райский сад» исчез, уступив место огромному разнообразию ползающих и плавающих плотоядных и травоядных.

Почему появление первых подвижных животных произошло так нескоро? Возможно, виной тому были факторы внешней среды, например, низкое содержание кислорода в атмосфере или очень высокие температуры воздуха и воды. Доподлинно известно лишь то, что 600–550 млн лет назад появилась целая категория новых существ: у них имелись внутренние полости, наполненные водой, которые могли служить подобием скелета (гидростатический скелет). Также существовали организмы с мускулами, нервами, специализированными рецепторными клетками, половыми клетками, клетками соединительных тканей и со способностью производить твердые скелетные части. Животные или неживотные, существа эдиакария были первыми, у кого развился скелет. Скелет позволял нарастить мускулатуру, а мускулы предполагают способность к передвижению. Передвижение в свою очередь стало двигать эволюцию дальше, к еще

большей усложненности организмов. Со способностью передвигаться у живых существ появилась необходимость развивать рецепторную/чувственную систему, чтобы искать пищу и себе подобных, а также избегать столкновений с хищниками. Чувственная информация предполагает наличие мозга, который порождает такие импульсы. Все эти условия в целом создали основу для такого эволюционного развития, которое привело в конце протерозоя к настоящей революции многоклеточных.

Сейчас можно только фантазировать о том, что представлял собой «базовый» многоклеточный организм, первый предок всех сложных организмов на планете. Он, по всей видимости, был маленьким, состоящим из очень небольшого числа клеток, клеточных стенок не было, имелся внешний покров, защищающий от внешних воздействий, а внутри должны были располагаться полости с коллагеном, который служил скелетной основой организму. Кроме того, должен был существовать «генетический инструмент», позволяющий организму развиваться в размерах и сложности и стать в конце концов миром эукариотов: больших, приспособляемых, двуполых многоклеточных с высокой степенью адаптивности к среде. Ползая, плавая, двигаясь на лапах и даже прикрепляясь к одному месту, они распространяют многообразие жизни по всей Земле. Животные с двусторонней симметрией — как мы с вами — доминируют по численности. Однако в раннем кембрии таких пока еще было очень мало, хотя в дальнейшем им суждено было расселиться по всей планете.

Сообщества вендской биоты

Обычно наука быстро решает проблемы, которые кажутся ей интересными. Однако эдиакарская фауна все еще не до конца изучена, все ее тайны не раскрыты до конца. Впрочем, за последние пять лет проведено много исследований в области, которая незаслуженно находится в тени смежных отраслей знания, — это палеоэкология. Хотя данное научное направление является мощным орудием изучения палеонтологических проблем, в последние десятилетия ей не удавалось сделать серьезных и заметных обобщений, поэтому о ней часто забывают. Но в новом тысячелетии это направление вновь возродили в своих работах Мэри Дрозер из Калифорнийского университета и Джим Гелинг из Музея Южной Австралии.

Палеоэкология помогла им разобраться в особенностях существования более крупных, чем описанные выше, представителей эдиакарской фауны.

Дрозер и Гелинг считают, что вендобионтов необходимо изучать с учетом особенностей их сосуществования с покровными микроорганизмами морского дна. Сообщества микроорганизмов, образующих на поверхностях морского дна целые «полотнища», не могут не иметь большого влияния на экологию тех мест, где они обитают. В первую очередь это касается процессов, связанных с органическими осадками. Поскольку в эдиакарии не существовало еще организмов, которые строили бы норы в морском грунте и осажденных на дно органических останках, то экология морского дна тех времен была совершенно не похожа на современные экосистемы в тех же областях моря.

Экологическую связь с покровными микроорганизмами в эдиакарии могли иметь четыре типа живой природы:

- формы, которые устраивались на поверхностях покровов и, возможно, выделяли особые пищеварительные ферменты, растворяющие покров и обеспечивающие пищевой ресурс;
- формы, которые попросту «паслись», поедая покровные микроорганизмы;
- формы, которые образовывались также на поверхности покровов, но использовали их для движения к поверхности воды — образующиеся покровы разрастались вверх, к свету и теплу;
- формы, которые обитали под покрывами.

Некоторые из этих форм могли существовать и в кембрии, но с появлением более крупных травоядных, хищников, а также организмов, которые строили туннели, вид этих экосистем в дальнейшем до неузнаваемости изменился.

Удивительный мир подобных живых сообществ также интересен с точки зрения их сохранности в ископаемых отложениях. Исследователи сделали предположения, что останки вендобионты, которые можно обнаружить в породах, не столько затвердевали сами по себе, сколько сохранялись благодаря тому, что вскоре после гибели их покрывали своим «полотном» микроорганизмы, которые потом и способствовали окаменению.

Эдиакарские микроокаменелости с шипами

Одноклеточная жизнь господствовала на Земле миллиард лет, и окаменелости, оставшиеся от них, — это микроскопические шарики с гладкими стенками. Но в отложениях, относящихся к периоду, который последовал за последним неопротерозойским «снежком», обнаруживаются также микроокаменелости, имеющие усложненную фактуру, в том числе шипы. Период существования форм, давших такие окаменелости, был совсем короток (600–560 млн лет назад), однако значение их велико, поскольку они напоминают скорее переходные формы от одноклеточных к многоклеточным, чем простые одноклеточные ископаемые. Такие «колючие» останки на самом деле могут рассматриваться как стадии развития организмов в состоянии цисты.

Этим необычным ископаемым посвящено несколько работ, в том числе биологов Ника Баттерфильда и Кевина Петерсона^[100]. Эти ученые считают, что появление таких микроокаменелостей с фактурными поверхностями в раннем эдиакарии было реакцией на возникновение первых хищников, например, нематод. Шипы, таким образом, были защитным механизмом. Однако группа исследователей во главе с Ноллом предположила, что усложненность строения поверхностных покровов этих ископаемых позволяет считать их формой состояния покоя каких-либо существ. Это предположение ведет к выводу о том, что относительно сложная и ранняя эволюция животных происходила и до того, как в эдиакарии появились существа, оставившие первые более крупные окаменелости. А кроме того, если данное предположение верно, то эдиакарий не был райским садом. Необходимость образовывать цисту возникает в неблагоприятных условиях колебания кислородного уровня, возможно, иногда толщи воды вовсе лишались кислорода и насыщались сероводородом. Ранний период эволюции животных, таким образом, был труден.

В поисках «двусторонних»

Появление тел с двусторонней симметрией было еще одним значимым скачком эволюции. Животное с двусторонней симметрией имеет четко выраженный «перед» и «зад», и внутренние органы располагаются более-менее симметрично по обе стороны этого «передне-заднего» трубкообразного тела. Так, мы полагаем, выглядел предок разнообразного животного мира. Но вот возраст такого ископаемого очень долго не могли определить.

Согласно генетическим исследованиям, он жил 573–656 млн лет назад^[101]. Но окаменелости не дают четкого представления о живом организме, который должен был иметь червеобразное тело без скелета, не более миллиметра в длину. Если не упоминать о заслуженной насмешке со стороны дарвинской теории, здесь, в любом случае, даже ископаемая летопись должна иметь явный пробел: очень невелики шансы, что существо без скелета и не более миллиметра длиной могло оставить какие-то следы своего присутствия.

Но тут помогли находки в Китае^[102]. В начале XXI века там обнаружили породы, которые по возрасту предположительно относились к периоду, когда должен был появиться первый двусторонне симметричный организм. Образцы очень долго и тщательно анализировали на предмет точной датировки, чтобы определить, именно к тому ли специфическому моменту времени они относятся. Когда эта работа была закончена, начались поиски гипотетического ископаемого. И датировка, и последующий поиск оказались нелегким делом.

Понадобилось три года, в течение которых кусок породы разрезали на 10 тысяч отдельных тончайших пластин (настолько тонких, чтобы через них проходил свет и они, таким образом, могли быть изучены под микроскопом), и было найдено как раз такое животное. Оно было даже меньше миллиметра: его длина равнялась толщине человеческого волоса. Его рассмотрели, изучили и назвали это крошечное чудо *Vernanimalcula*. Ему было около 600 млн лет.

Недостающее звено нашлось. Маленькие и невзрачные, эти существа были настоящими революционерами — самыми ранними организмами с двусторонней симметрией, которые прокладывали путь остальным. Но это еще не всё: в добавление к ископаемым с двусторонней симметрией в формации Доушаньто в юго-западном Китае обнаружили также яйца и эмбрионы самых древних животных. Это открывает нам путь к пониманию того, как изменялись животные в течение 600 млн лет до сего дня и как они меняли саму природу осадочных летописей.

До животных не существовало «биотурбации»: перемешивания наслаивающихся осадочных материалов под воздействием жизнедеятельности организмов. Это вмешательство животных в образование осадочных пород настолько сильно сегодня, что является распространенным правилом, на фоне которого исключения очень хорошо заметны. Например, дно современного Черного моря (на больших глубинах там нет животных) очень твердое и демонстрирует и четкое расслоение, и очень низкое содержание воды. Контрастом ему является дно любого насыщенного кислородом моря: несколько сантиметров над донным субстратом полны тины, экскрементов и прочего растворенного органического материала. Далее вглубь не обнаруживается и выраженное расслоение, поскольку все перекапывается и поедается, и так без конца: медленнодвигающиеся беспозвоночные или едят на ходу (осадочный материал поглощается — осадочный материал выделяется в виде экскрементов), или удирают, или строят норы. Значительная толщина придонных осадочных слоев очень насыщена водой в результате такой жизнедеятельности.

Из всех изменений это было одним из самых важных. В XX веке его прозвали «агронамической революцией», она — главный отличительный признак между состояниями морского дна между протерозоем и фанерозоем и, соответственно, этапами стратиграфической летописи, которую они после себя оставили^[103]. Симметричные организмы перемещались не только по поверхности осадочных материалов, которые они быстро заселяли. Они также рыли норы и таким образом производили вертикальное освоение дна. По нашему разумению, такое не могло происходить без достаточной кислородной насыщенности морей: наполняемость кислородом донных отложений осложняется даже при наличии нор и наверняка была невозможной при общемировом содержании кислорода в окружающей среде, скажем, менее 10 %. Раньше считалось, что строматолиты и микробиотный покров морского дна исчезли на рубеже протерозоя и кембрия потому, что их съели появившиеся более крупные животные. Новый взгляд предполагает, что животные с двусторонней симметрией не просто поедали питательные покрывала, состоящие из микроорганизмов, но также создавали твердый субстрат, который способствовал почти полному исчезновению этих покровов.

Глина, жизнь на суше и создание среды, пригодной для существования животных

Самое окончание протерозойского эона, около 600 млн лет назад, ознаменовалось установлением всех условий, пригодных для существования животных. Все необходимые генетические инструменты для развития больших размеров, скелета и разнородных тканей для разнообразной деятельности оказались на своих местах. Не хватало только одного — достаточного количества кислорода. 600 млн лет назад эволюция животных оказалась «на низком старте», но кислорода для нее было мало. Но примерно 550 млн лет назад ситуация изменилась — кислорода прибавилось.

То, как и почему это произошло, самым незамысловатым образом показала группа геологов, которые работали на стыке нескольких направлений: геологии, химии, биологии. Другими словами, самая сладкая ягодка научного прорыва созрела не на одном из традиционных научных полей, а на меже. Группа под руководством Мартина Кеннеди из Университета Аделаиды раскрыла важную для атмосферных изменений роль мельчайших осадочных частиц — микроскопических крупинок глины ^[104].

Из всех геологических субстанций глина — минерал с наименее романтической судьбой. И тем не менее в больших количествах она способна изменить химический состав воздуха и воды на всей планете — что, собственно, и произошло. Кеннеди с коллегами утверждает, что возрастание количества частиц глины на морском дне по краям континентов спровоцировало изменение в объемах отложений органических останков, поскольку возрастающее количество восстановленных молекул углерода задерживалось на поверхностях микроскопических глинистых частиц. Австралиец Кеннеди вскоре стал первым директором Геологического центра имени Реджинальда Спригга в Университете Аделаиды. Это новое учреждение, названное в честь первооткрывателя эдиакарских ископаемых, ориентировано на развитие недавно появившейся науки — геологической биологии. Работа Кеннеди показывает нам, почему уровень содержания кислорода так быстро вырос во времена эдиакарской биоты в позднем протерозое. Значимость изысканий Кеннеди в том, что если представители этой биоты и исчезли потому, что появились более развитые животные, то кончина их была еще и ускорена простым изменением того, как и где в океанах накопились самые крошечные из всех осадочных частиц.

Как было сказано в предыдущих главах, количество кислорода в атмосфере (и в гидросфере, коль скоро они непосредственно соприкасаются почти по всей поверхности морей) зависит от нескольких факторов, включая биологическое производство кислорода посредством фотосинтеза. Но куда более весомый эффект дает отложение и выветривание органического материала. Органические молекулы, такие как этан и метан, «восстановлены», а значит, и быстро окисляются, если приходят в соприкосновение с кислородом, растворенным в воде. Этот процесс химически изменяет кислород в молекулу (такую как H_2O), которая больше не может окислять другие восстановленные молекулы. Но «восстановленные» органические молекулы могут терять контакт со свободным кислородом в воздухе или воде. Это может происходить, например, когда они быстро покрываются осадочными материалами и, таким образом, не имеют контакта с кислородом, растворенным в определенном море или озере. Кислород, постоянно продуцируемый растениями, в таком случае может накапливаться, что приводит к еще большей концентрации его в атмосфере. Если достаточное количество «восстановленных» органических молекул оказывается погребенным под осадочными частицами или, наоборот, вырывается на волю (что означает

уменьшение объемов кислорода), то эти процессы могут приводить к существенным изменениям в атмосфере и, таким образом, влиять на жизнь на Земле. Но есть одна большая проблема. В осадочных породах наблюдается относительно небольшая концентрация органических молекул по сравнению почти с любым другим элементом, и если только органика каким-либо образом не удерживается на месте, то она мало накапливается в осадочных породах.

Органические молекулы и в самом деле *легки*. Бензин, например, представляет собой короткую органическую молекулу: он плавает на поверхности воды и быстро испаряется. Большая часть всего объема органических молекул, обнаруженных в океанах, реках и озерах, получается в результате разложения биологического материала, распада растительной или животной ткани на короткие цепочки углерода, химически связанного с атомами водорода. Единственный способ похоронить такие легкие молекулы под осадочными породами — это дать им какой-нибудь балласт. Вот тут-то и вспомним про глину. Кеннеди и его команда заметили, что глина без труда цепляет органические молекулы с помощью различных химических или даже механических способов. Медленно погружаясь ко дну сквозь толщу воды, маленькие частицы глины по пути подхватывают еще более мелкие органические молекулы и тянут их за собой на дно моря или озера. Словно хлопья снега во время снегопада, падающие частицы покрываются все большим количеством глинистых «снежинок», укрывая — слой за слоем — органические молекулы. Со временем в твердых толщах Земли накапливается большое количество восстановленных органических соединений. В результате повышается уровень кислорода.

Появление глинистых частиц — результат выветривания пород. Если кусок гранита оставить на растерзание стихиям, то он начнет постепенно крошиться. Некоторые из таких разрушений механические (например, процессы замерзания-таяния, когда вода попадает в тончайшие трещинки, замерзает и тает там, в процессе постепенно разрушая породу). Но чаще всего это результат химических реакций дождевой воды с какими-нибудь веществами в самом граните. В минеральном составе возникают значительные изменения, и одним из результатов такого выветривания является глина. Но большая часть глины происходит не из гранита на поверхности почвы, а из самой почвы. Там выветривание маленьких минеральных крупиц происходит в химически сложных, а иногда и кислотных микроусловиях в комбинации с органическими и неорганическими соединениями. И возникают комочки глины.

Почва фактически обеспечивает обе необходимые части уравнения под названием «как увеличить объемы кислорода»: и глину, и органику. Все, что потребовалось в позднем протерозое, это смыть большое количество органики из материковых почв в океан. Там глина и органические молекулы объединились, утонули и укрылись под осадочными породами. Проблема была решена, хотя и есть одно заковыристое обстоятельство: в учебниках-то написано, что на протерозойских материках не было значительного количества почвы, поскольку не было наземных растений.

Чтобы объемы кислорода достигли уровня, необходимого для животных, а это как минимум 10 % от содержания всех газов в атмосфере (для сравнения — сегодня в атмосфере содержится около 21 % кислорода), необходимо было «похоронить» огромное количество органических молекул. И кислорода-то *в самом деле* стало больше! Это можно объяснить, только предположив, что непосредственно перед появлением животных произошло какое-то весьма радикальное изменение в осадконакоплении. Такое новое видение вопроса, пожалуй, наилучшим образом обобщила группа Кеннеди в конце своего научного труда: «Итак, мы показываем минералогическое и геохимическое свидетельство увеличения глинистых

отложений в позднем протерозое, которое непосредственным образом предшествовало появлению многоклеточных животных. Большинство современных глинистых минералов происходят из биологически активных почв, таким образом, первоначальное распространение примитивной сухопутной биоты сильно продвинуло выработку глинистых веществ, а это усилило развитие самих почв („фабрику глины“) и привело к увеличению морских отложений органического углерода посредством их сохранения под минеральными покровами».

Выводы этой работы невозможно переоценить. Самым важным, наверное, является то, что до недавнего времени мы сильно заблуждались насчет датировок и усложненности сухопутных живых сообществ в ранней истории Земли. Оказывается, они существовали намного раньше и имели намного более развитую, усложненную, разнообразную структуру, и у биомассы присутствовала иерархия. Более того, как показано еще в одной статье Кеннеди и его коллег, имеются объективные, прослеживаемые в геологической летописи свидетельства того, что уже в период кембрийского взрыва в пресноводных реках и озерах существовали усложненные живые организмы и сложные экосистемы. Это тоже дает важный вывод для понимания истории развития жизни. Все более и более очевидным становится тот факт, что завоевание суши животными и высшими растениями не обязательно происходило как прыжок из океана в сухопутные среды обитания. В большинстве случаев сперва происходил переход из соленой воды в пресную, а уже потом, на основе освоения пресноводных водоемов, жизнь вышла на сушу. В конечном итоге покорение суши было наиболее логичным следующим биологическим шагом, поскольку пресноводные сообщества уже состояли из животных и растений, строение организмов которых вполне могло такой шаг обеспечить.

Глава 8

Кембрийский взрыв:

600–500 миллионов лет назад

Семидесятилетний Чарльз Дарвин на фотографиях выглядит намного старше своих лет. В свои 70 Дарвин уже был на пороге смерти: донельзя измученный нападками многочисленных критиков и бесплодными поисками причин того, как организмы наследуют свои качества (генетика была признана наукой лишь в начале XX века, когда заново «открыли» работы Грегора Менделя). Невозможность объяснить природу кембрийского взрыва особенно повлияла на него — и морально, и физически Дарвин терпеть не мог ископаемые останки вообще и кембрийские ископаемые в частности. Кембрийские отложения досаждали ему до самой могилы. На смертном одре он, без сомнения, более всего сожалел о неразгаданной тайне кембрия и непонимании генетических законов.

Еще до появления трудов Дарвина было хорошо известно, что ископаемые отпечатки животных появляются в геологической летописи довольно внезапно. Великий английский геолог Адам Седжвик, первооткрыватель кембрийского периода как такового, отмечал начало этого периода по слою, в котором появляются первые трилобиты. Хотя мы и представляем геологические периоды как временные отрезки, на самом деле они проявляются как последовательность слоев, дно которых отмечается первым появлением каких-либо ископаемых, а верхняя часть — либо исчезновением определенных ископаемых, либо (что лучше) первым появлением новых организмов. Такова и кембрийская система. Кембрийский период — это время, когда накапливались именно кембрийские ископаемые, ни больше ни меньше.

Седжвик установил, что в течение геологически кратких отрезков времени относительно бедные по наличию ископаемых осадочные породы перемежались породами, демонстрирующими настоящее изобилие хорошо просматриваемых окаменелостей, самыми частыми из которых были трилобиты. Трилобиты — ископаемые членистоногие, а значит, свидетельствуют о высоком развитии и усложненности уровня животных. Это наблюдение было особо досадным для Дарвина (и очень приятным для его критиков), поскольку являлось настоящей пощечиной для только-только представленной к обсуждению теории эволюции^[105].

Итак, Чарльз Дарвин сошел в могилу, проклиная окаменелости. Его талант подсказывал ему, что он прав, и тем не менее до самого конца своей жизни Дарвин вынужден был терпеть критиков, которые отмечали, что большая степень усложненности «первой» жизни на Земле противоречила красноречивым описаниям происхождения видов в изложении Чарльза Дарвина: трилобиты просто не могли появиться. Самое забавное в этой истории то, что трилобитов и не существовало по крайней мере вплоть до второй половины кембрия^[106].

Членистоногие-трилобиты, хрестоматийный пример ископаемых, царили в океанских средах обитания на относительно раннем этапе истории развития животных. Но вот насколько раннем? Во времена Дарвина трилобиты считались самыми древними животными^[107]. А ведь они были, без сомнения, очень сложны: с тремя сегментами тела, фасеточными глазами, сложными конечностями. И очень больших размеров — некоторые из самых древних достигали в длину 60 см. Самые первые животные определенно *не должны* были так выглядеть. Скорее, они должны были иметь меньшие размеры и намного более

простое строение. Теперь мы знаем, что трилобиты даже близко не были самыми первыми животными. На самом деле трилобиты появились в истории развития жизни по меньшей мере на 20 млн лет позднее начала кембрийского периода.

История происхождения животных на Земле — одна из самых захватывающих глав в истории развития жизни в целом и одна из самых противоречивых. За одно только последнее десятилетие появилось множество новых фактов. Существуют две линии датировок развития животных типов, и эти датировки весьма отличаются друг от друга: одна линия основывается на особенностях изображений ископаемых в геологических отложениях, другая — на модели молекулярных часов ныне живущих существ. Обе дают важные подсказки к пониманию одной из самых главных палеонтологических загадок — быстрому развитию многообразия животного мира.

Первый ключ к пониманию кембрийского взрыва дают ископаемые. Окаменелости животных в породах появились четырьмя последовательными волнами. Первая началась около 575 млн лет назад и получила название «авалонский взрыв» — по месту в восточной Канаде, где произошло открытие этих первых окаменелостей. Вторая волна совпала с почти полным исчезновением вендобионты и характеризуется не наличием непосредственных отпечатков животных, но следов их передвижения. Столь многочисленные «следы жизнедеятельности» могли оставить только многоклеточные организмы, способные к самостоятельному передвижению, то есть животные. Этим отпечаткам около 550 млн лет. Морское дно явно населяли весьма деятельные, подвижные маленькие червеобразные существа^[108].

Третья волна знаменуется появлением скелетов — огромного количества крошечных скелетных элементов — в слоях моложе 550 млн лет. Это очень маленькие остии и пластинки карбоната кальция, который покрывал животных панцирем, чем-то напоминающим скелет, почти как черепицей. Наконец, появились более крупные окаменелости животных, включая трилобитов, моллюскообразных плеченогих (брахиоподов), колючих иглокожих, а также множество разнообразных моллюсков, похожих на улиток. Все они найдены в слоях моложе 530 млн лет. Во времена Дарвина о первых трех волнах ничего не было известно, и кембрий датировался появлением первых трилобитов в осадочных породах. Аргументы в пользу этой последовательности волн могут быть обманчиво просты: уровень кислорода постоянно повышался от этапа к этапу, от волны к волне.

Сегодня известно, что последовательность в возникновении новых типов животных выстроилась сравнительно быстро, новые методы датировки относят появление первых по-настоящему сложных *ископаемых* (малые скелетные окаменелости, которые на 20 или даже 10 млн лет моложе первых следов жизнедеятельности) к периоду немногим старше 540 млн лет. Первые трилобиты при этом появились в отложениях на миллионы лет позднее. В противоположность этой датировке, которая определяет возраст первых животных как «чуть-чуть за полмиллиарда», молекулярные исследования ныне существующих животных (рассматривают возраст расхождения основных генеалогических линий) предполагают, что возраст происхождения животных намного больше 550 млн лет. Одна очень авторитетная работа, опубликованная Чарльзом Реем и его коллегами из Американского музея естественной истории, датирует отделение животных видов от их протерозойских предков одним миллиардом лет. Согласно этой последней точке зрения, царство животных возникло очень рано, но его представители оставались очень маленькими и незаметными (в плане окаменелостей) еще полмиллиарда лет.

Оба метода датировки совпадают в том, что появление животных в ископаемых отложениях демонстрирует очень важный период, который называется кембрийским

взрывом. Для палеонтологов этот взрыв отмечает первый этап эволюции животных. Для молекулярных генетиков кембрийский взрыв знаменует появление животных достаточно больших, чтобы оставлять окаменелости в породах. Несоответствия между этими двумя точками зрения остро проявились в 1990-х годах и были разрешены в самом начале уже XXI века. Тогда новые молекулярные исследования^[109] с использованием более тонких инструментов анализа основательно подтвердили версию, что животное царство возникло гораздо раньше, чем предполагали палеонтологи. На сегодняшний день существует соглашение: животные появились не раньше 600 млн лет назад и, возможно, имеют возраст около 550 млн лет^[110]. Впрочем, это не является насмешкой над тем фактом, что вендобионта появилась 575 млн лет назад, и убеждает многих, особенно Грега Реталлака из Университета Орегона, что представители вендобионты являлись не животными вовсе, а большими и сложными формами грибов. Такие вот странные подводные грибы. Сторонники данной точки зрения остаются в меньшинстве. На сегодняшний день кембрий датируется периодом от 544 до 495 млн лет назад (впрочем, верхняя граница, отмечающая начало ордовика, может быть немного старше). Примерно за 50 млн лет появилось огромное множество животных различных типов. Все специалисты сходятся во мнении, что этот период был самым значимым во всей истории развития жизни, если не считать важность появления самой жизни на Земле^[111]. Согласно самым новым сведениям, уровень кислорода в начале кембрия составлял около 13 % (сегодня 21 %)^[112], но со временем он возрастал. Во время кембрийского периода содержание углекислого газа было значительно выше сегодняшнего, в сотни раз выше, и такой высокий уровень производил сильнейший парниковый эффект, достаточный, чтобы перекрыть действие Солнца, активность которого в те времена была несколько менее интенсивной, чем сегодня. Даже с падением уровня углекислого газа к концу кембрия температуры того времени были самыми высокими из всех за всю историю жизни животных на планете. Поскольку при высоких температурах кислород поступал в морскую воду в меньшей степени, то и без того невысокий уровень этого газа в океанах неуклонно понижался.

Совсем недавно в Китае, в провинции Цзянси, были обнаружены совершенно потрясающие окаменелости мягкотелых организмов, которые позволяют по-новому посмотреть на происхождение животных на Земле, на природу кембрийской планеты, какой она была до появления животных, ископаемые которых найдены в сланцах Бёрджесс в Британской Колумбии — самом знаменитом месторождении из всех существующих. Окаменелости из Цзянси датируются сейчас периодом 520–515 млн лет назад, тогда как сланцы Бёрджесс относят к периоду не старше 505 млн лет. Около 10 млн лет разделяют эти два отложения, и мы получаем новое представление о том, как развивалось разнообразие животных.

И в Цзянси, и в Бёрджесс сохранились не только скелетные, но и мягкие части животных^[113], поэтому у нас есть хорошая картина того, что за организмы и в каких количествах существовали в тот период. Без этих новых данных о мягкотелых животных относительно корректного представления о многочисленности различных видов у нас бы не сформировалось, а ведь, скорее всего, существовало очень большое разнообразие таких организмов, как черви или медузы — у них нет скелета. Так что вполне понятно, какое удивление вызывает факт такого четкого изображения ископаемой фауны в обоих местах. В сланцах Бёрджесс собрали уже около 50 000 образцов, и чуть меньше в Цзянси. В своей книге *The Fossils of the Burgess Shale* («Ископаемые сланцев Бёрджесс», 1994 г.^[114]) Дерек Бриггс, Дуг Эрвин и Фред Коллье делают блестящее обобщение на основе материалов фауны

Бёрджесс, предлагая список из 150 наименований видов животных. Большинство — членистоногие или подобные им, а число видов, представленных единственным образцом, вызывает большее удивление. Более 90 % всех окаменелостей — это членистоногие, за ними следуют губки и плеченогие. Как и в более ранних образцах из Цзянси, в сланцах Бёрджесс просматривается явное преобладание членистоногих над прочими видами как по числу, так и по разнообразию.

Членистоногие — одни из самых сложно устроенных беспозвоночных, и при этом уже на таких ранних этапах, к которым относятся ископаемые Бёрджесс и Цзянси, их было множество, и они были очень разнообразны. Это говорит о долгой эволюции, предшествующей их первому появлению в различных породах. Возможно, на морском дне ползали членистоногие не более миллиметра длиной, а над ними в открытом океане плавали еще более многочисленные создания.

Едва ли не самым удивительным при посещении сланцев Бёрджесс для авторов этой книги (им обоим посчастливилось там побывать) было то, что наиболее распространенные окаменелости принадлежат... трилобитам, а не каким-то экзотическим мягкотелым видам и классам, наименования которых богато представлены в многочисленных книгах по флоре и фауне сланцев Бёрджесс. Трилобиты, а также немного меньшее количество прочих членистоногих намного превосходят числом и разнообразием устройства тела как отдельные образцы, так и даже целые виды, обнаруженные здесь^[115]. Описать численность членистоногих можно словом «диспропорция», поскольку очевидно, что членистоногие были самым процветающим типом живых существ кембрия. Насколько это процветание зависело от основной модели устройства тела — сегментации?

Животные с сегментированным телом являются самыми распространенными на нашей планете, и большинство из них — членистоногие. Тела всех членистоногих, включая самый разнообразный класс (насекомых), состоят из последовательности повторяющихся сегментов, а также отделов, основанных на группах отдельных сегментов, каждый из которых имеет свои функции в организме. Членистоногие, впрочем, не единственные, кто обладает сегментированным телом. Например, тела кольчатых червей сегментированы, и некоторые представители групп, вроде моллюсков-моноплакофор, у которых в целом нет сегментации, демонстрируют некоторую степень деления тела на сегменты.

Объединяет сегментированные отделы наличие сочлененного экзоскелета, покрывающего все тело. Экзоскелет не может расти, он постепенно изнашивается, сбрасывается и заменяется на больший. Тело имеет хорошо выраженные голову, грудной отдел и брюшко самых разнообразных пропорций. Конечности, как правило, специализированы. У наземных членистоногих конечности большие и односложные (одноветвистые), а у морских форм обычно имеются по два ответвления на каждую конечность, могут быть внешние жабры, поэтому их называют двуветвистыми.

Экзоскелет покрывает мягкие части тела как панцирь, и, возможно, это его прямое назначение — защита. Но на самом деле функции такого скелета гораздо шире: сквозь такой покров невозможно прямое проникновение кислорода. Чтобы поглощать кислород, первые древние членистоногие, а все они были водными обитателями, должны были обзавестись специальными дыхательными органами, или жабрами.

В 2004 году Джеймс Валентайн в книге *The Origin of Phyla* («Происхождение таксономических типов»^[116]) высказался по поводу одной из главных эволюционных загадок: почему в кембрии развилось так много видов, и почему именно членистоногих? В частности, он писал:

«Хотя многие ранние членистоногие не имели затвердевшего панциря, тем не менее, их было так много, и они были так разнообразны и при этом имели совершенно определенные характеристики, что являются одной из важнейших проблем таксономической систематизации. Эти несопоставимые виды членистоногих типологически никак не классифицировать, что просто сбивает с толку. Такой очевидный взрыв эволюции среди членистоногих удивителен даже для кембрийского периода».

То, что мы называем «членистоногими», на самом деле неоднородная группа, по-видимому, независимо развивавшихся типов организмов, которые в процессе эволюции обзавелись большим разнообразием форм, но с одним общим компонентом: у всех на каждом сегменте имеются конечности с двумя элементами, то есть являются двуветвистыми. Каждая конечность имеет, во-первых, некое подобие ноги, а во-вторых, длинную жаброобразную бородку.

Почему первичные формы животных предпочли сегментированное тело? Возможно, это неправильное слово. Валентайн и другие исследователи отмечают, что членистоногие не так уж и сегментированы. Кольчатые черви, в отличие от членистоногих, имеют отдельные камеры-сегменты, повторение которых и составляет их тело. Валентайн считает, что появление такого строения было реакцией на потребности передвигающихся тел. Он отмечает: «Очевидно, что сегментная структура тела членистоногих связана с их механизмом передвижения, а также с нервной и кровеносной системами, которые его поддерживают» Без сомнения, такое строение является результатом адаптации для облегчения движения. Последствием такой эволюции тела стало возникновение сегментов с жабрами. Каждый жаберный элемент был оптимального размера по отношению к нижней части каждого сегмента — в этом месте сквозь веероподобные жабры прокачиваются большие потоки воды, увеличивая таким образом количество молекул кислорода, соприкасающихся с жабрами каждую секунду^[117].

Другое живое существо, в изобилии присутствующее в отложениях кембрийского периода, это губки. Как и стрекающие кишечнополостные, губки не имеют дыхательных систем, и неожиданностью это не является, так как у этих организмов структура тела представляет собой несколько полостей, как и у кишечнополостных, но с еще меньшей степенью сложности. У всех губок очень большая поверхность тела по сравнению с объемом. На деле губки очень похожи на агрегации многочисленных одноклеточных, при этом каждая клетка находится в контакте с морской водой. В дополнение к этой замысловатой структуре у губок есть еще один механизм эффективного добывания кислорода: их основная клетка, отвечающая за питание — воротничковая, — позволяет проходить через тело губки большому количеству воды. Некоторые эксперты по губкам предположили, что каждый день губка пропускает сквозь себя воды в 10 000 раз больше объема собственного тела. Такая способность позволяет отнести губки к категории организмов, имеющих «насосные жабры», поскольку они с силой пропускают воду сквозь клетки в феноменальных количествах. Поэтому губки и могут жить в условиях с очень низким уровнем кислорода.

Очевидно, что в кембрии самой большой группой животных, имеющих твердые части, были членистоногие. За ними, немного уступая по численности, идут плеченогие, иглокожие и моллюски. Плеченогие существуют и по сей день и относятся к мшанкам, которых часто путают с двустворчатыми моллюсками. Хотя раковины плеченогих и двустворчатых моллюсков внешне выглядят почти одинаково, внутренняя анатомия этих двух групп различна. Основной чертой плеченогих является питающий орган, называемый лофофор,

который состоит из большого венчика, имеющего множество длинных тонких ресничек, нежным веером выступающих из раковины. Этот орган фильтрует морскую воду ради пищи, а так как он полый внутри (продолжает внутреннюю полость тела) и очень тонкий, то служит еще своеобразным органом дыхания. Некоторым из нас судьба плеченогих покажется трагичной. Они были, возможно, самыми распространенными обитателями морского дна в палеозойскую эру, а во время пермского массового вымирания около 250 млн лет назад почти полностью исчезли и уже никогда не восстановили былое превосходство.

Кембрийские иглокожие составляют группу очень странных маленьких существ, похожих на коробочки. Среди самых древних иглокожих в отложениях находят любопытные формы: похожих на сосновые шишки животных-гелиоплакоид, примитивных эокриноидей и эдриоастероидей.

Более распространенными, чем иглокожие, были моллюски. Большинство из них в кембрийский период были маленькими, в кембрийском субстрате найден каждый из основных классов: брюхоногие, двустворчатые, головоногие. Самыми распространенными моллюсками тем не менее являлись моноплакофоры (сегодня это немногочисленный класс). У них присутствовали блюдцеподобная раковина и тело улитки с широкой ногой, позволяющей ползать. Что интересно, из всех моллюсков того времени только у них тело имело признаки сегментации. При рассмотрении ископаемых останков и сравнении их с современной анатомией живых форм можно заметить, что у кембрийских моноплакофор, по-видимому, были множественные жабры. Современные брюхоногие имеют одну пару жабр или даже одну-единственную жабру. Но для кембрийских моноплакофор оказалось важным обзавестись множеством жабр. Эти организмы пользуются уважением как предки моллюсков, давшие жизнь всем прочим: и брюхоногим, и головоногим, и двустворчатым, а также многим классам других, менее распространенных моллюсков.

Долгое время моноплакофоры считались вымершими в конце пермского периода, но в 50-х годах XX века на большой глубине обнаружили живых представителей этого класса, что позволило получить более широкое представление о жизни ранних моллюсков. Живущие сегодня формы подтверждают, что следы на окаменелостях внутренних сторон раковин древних моноплакофор все-таки являются следами более чем одной пары жабр. В действительности множество пар мышц идут по всей длине внутренней поверхности раковин. Это дает основание полагать, что древние формы моноплакофор имели очевидную сегментацию или, по крайней мере, систему повторяющихся жабр и кровеносных сосудов. Поскольку эти жабры, а также кровеносная и фильтрующая системы демонстрируют регулярное повторение по всей поверхности тела, можно заключить, что, как и у членистоногих, такое строение было результатом приспособления к условиям, когда необходимо было прогонять через тело много воды. Сегодня похожее повторение структуры, распространяющееся даже на раковину, можно обнаружить у некоторых моллюсков, во множестве обитающих в прибрежной зоне.

Как и тело иглокожих, раковина плеченогих почти полностью заполнена водой. Внутри очень мало плоти, и она постоянно соприкасается с потоком морской воды. Плеченогое лофофора создает несколько потоков, которые проникают по сторонам раковины внутрь, проходят по телу организма, а затем выталкиваются через переднюю сторону раковины. Эта постоянная смена воды внутри плеченогих выполняет ту же функцию, что и потоки, проходящие сквозь губки. Малый объем и большая поверхность тела в совокупности с постоянным потоком воды (объем воды во много раз превышает внутренний объем раковины) делают плеченогих хорошо приспособленными к условиям с малым количеством кислорода.

Физические и химические причины кембрийского взрыва

Ранее в этой книге мы уже отмечали появление совершенно новых научных направлений, самыми заметными из которых являются астробиология и смежная с ней дисциплина — геобиология. Однако есть еще одна научная отрасль, развивающаяся в русле самых традиционных теорий биологической, точнее, эволюционной направленности, но претерпевшая столь значительное переосмысление, что считается новой наукой. Последователи этого направления называют его «эво-дево». Это настоящий прорыв в области эволюционной биологии развития, и представителям этого направления, исходя из исследований последних 10 лет, есть что сказать по поводу кембрийского взрыва. Один из известнейших представителей эво-дево Шон Кэрролл предлагает нам необычное путешествие в эту область на страницах своей книги 2005 года *Endless Forms Most Beautiful* («Бесконечное число самых прекрасных форм»^[118]). Основную тему книги можно сформулировать следующим образом: сегодня наука в состоянии лучше понять неразрешимую до этого проблему эволюционной биологии — происхождение новых форм. В рамках традиционной, дарвинистской, теории эволюции факт быстрого появления новых видов объяснить было невозможно. Радикальные новшества эволюции — крылья, ноги для ходьбы по земле, сегментация членистоногих и даже большие размеры, что является отличительной характеристикой кембрийского взрыва, — нельзя было объяснить лишь многочисленными и неожиданными мутациями, которые обновляли и изменяли весь организм в целом. Кажется, в рамках эво-дево удалось решить этот вопрос, и в своей книге Кэрролл перечисляет четыре аспекта, в совокупности позволяющие трактовать внезапные эволюционные нововведения и четко сформулировать новый способ объяснения кардинальных перемен в развитии жизни.

Первый так называемый (по Кэрроллу) секрет нововведений — это «работа с тем, что уже есть». Основная идея: «природа — умелец-самоучка». Нововведения не обязательно требуют нового набора инструментов. Использовать то, что есть под рукой, — самый простой путь. Второй и третий «секреты» были хорошо понятны и самому Дарвину: многофункциональность и избыточность.

Многофункциональность предполагает, что уже существующая морфологическая или физиологическая структура взяла на себя вторую, дополнительную функцию. Избыточность понимается как наличие нескольких структур для выполнения одной функции. Если для появления нового вида деятельности подключается один из этих двух секретов, а прочие части организма при этом функционируют как обычно, то открывается хорошая возможность для нововведения, и это путь гораздо проще, чем создание совершенно нового организма с нуля. Функции плавания и дыхания у головоногих это как раз такой случай. Головоногие перекачивают огромные объемы воды через жабры и подобно многим беспозвоночным используют отдельные «трубки» или каналы для подвода и отвода воды, чтобы обеспечить продвижение насыщенной кислородом воды. Но благодаря небольшому морфологическому «усовершенствованию» этих трубок появилось новое средство передвижения. Дыхание и движение могут теперь осуществляться с использованием одного и того же объема воды и для дыхания, и для перемещения в пространстве.

Последний секрет — модульность конструкции. Животные типа членистоногих и даже, хотя и в меньшей степени, позвоночные уже состоят из сегментов-модулей. Конечности, растущие из сегментов членистоногих, удивительным образом модифицировались в соответствии с разными функциями: питание, спаривание, движение и др. Членистоногие, как

швейцарский нож, в каждом сегменте имеют несколько элементов различного предназначения. Это правило верно и для позвоночных, таких как мы: у нас есть отростки, которые натренированы для различных целей — ходить, плавать, летать. Не так уж плохо для таких, казалось бы, примитивных пальцев на руках и ногах! Каким образом работает эво-дево? Оказывается, эти морфологические секреты являются тонкой шлифовкой для морфологических изменений, поскольку они основаны на системах генетических «включателей», которые расположены у развивающегося эмбриона в тех же местах, что и различные конечности у членистоногого (или позвоночного).

Включатели в данном случае — основной элемент, они сообщают различным частям тела, когда и где расти. То, что определенная последовательность отделов тела членистоногих, от головы до брюшка, заложена в хромосомах и проявляется в эмбрионе, стало одним из величайших открытий в науке. В основном это заслуга гомеозисных генов — драгоценных жемчужин среди прочих открытий направления эво-дево (они могут по — разному называться у разных таксономических групп, но присутствуют в том или ином виде у всех).

Многочисленные открытия эво-дево, безусловно, помогают ответить на многие вопросы истории развития жизни на Земле, в том числе раскрыть тайну кембрийского взрыва: когда и как появились разнообразные типы животных, известные сегодня, иными словами, их разнообразные морфологические типы.

Уже давно существуют два научных направления, в рамках которых изучается эта проблема. В русле первого полагается, что окаменелости дают нам истинную картину того, когда на самом деле возникла такая огромная дифференциация животных — около 550–600 млн лет назад. Сторонники второго предлагают рассматривать результаты сравнения генов — существующих и древних типов — и утверждают, что на протяжении более полумиллиарда лет животные существовали, но не оставляли окаменелостей, что на самом деле не было никакого эволюционного взрыва. Новейшие исследования показывают, что взрыв многообразия произошел где-то 700 млн лет назад или немного позже. Используя понятие «молекулярных часов», представители второго направления около двух десятилетий назад предположили, что более миллиарда лет назад в царстве животных произошло фундаментальное разграничение на два типа: первичноротые и вторичноротые. Эти две группы уже на уровне эмбрионов фундаментально различаются анатомически, а также принципами развития.

К первичноротым относятся членистоногие, моллюски, кольчатые черви и т. п. Этот тип характеризуется тем, что в период зародышевого развития на месте первичного рта, бластопора, образуется рот. У вторичноротых (иглокожие, позвоночные вроде нас с вами, а также другие типы) рот и бластопора разделены. Есть и третий тип очень примитивных существ, которые отделились от основной линии эволюции животных еще до разграничения между первичноротыми и вторичноротыми, к ним относятся стрекающие, губки и некоторые менее распространенные типы.

Первыми появились простые формы вроде стрекающих и губок, которые существовали, как мы убедились, в эдиакарии около 570 млн лет назад, то есть до кембрия, который начался 543 млн лет назад. Хорошо распознаваемое отличие между первичноротыми и вторичноротыми можно проследить не ранее кембрийского периода.

Каким же было живое существо, непосредственно предшествовавшее разграничению первичноротых и вторичноротых? Множество примеров указывают на то, что это животное было двусторонне симметричным и способным к самостоятельному передвижению. Многие исследователи животных того периода считают, что общий предок, с которого началось

разграничение первичноротых и вторичноротых, был маленьким червячком, подобным, возможно, современной планарии (*Planaria*) или крошечным нематодам. Однако самые последние данные говорят о том, что еще до разграничения первичноротых и вторичноротых у их предшественников уже были генетические инструменты для начала этого радикального изменения, и инструменты эти существовали по крайней мере, за 500 млн лет до того, как такое разграничение произошло! У этого червячка был рот спереди и анальное отверстие сзади, а между ними — длинная трубкообразная пищеварительная система. Возможно, у него имелись короткие выросты по бокам — своего рода органы химической рецепции и осязания. Как бы то ни было, такое положение вещей могло привести — и привело! — к быстрой трансформации. Вот это действительно новый взгляд на вещи: все необходимое для кембрийского взрыва пылилось на полках эволюции целых 500 млн лет!

Как уже упоминалось ранее, нижний слой кембрия формировался 543 млн лет назад. Этот слой определяется по породам, в которых впервые появляются различные следы передвижения живых организмов — следы жизнедеятельности, которые показывают, что тогда существовали подвижные животные. В течение последующих 15 млн лет, тем не менее, образования новых морфологических типов животных вроде бы не происходило. По крайней мере, среди окаменелостей их не обнаружить. Первые по-настоящему очевидные признаки большого разнообразия можно увидеть в недавно открытых отложениях в Китае^[119], о которых упоминалось в предыдущих главах. Эти отложения имеют возраст 520–525 млн лет и являются более древними, по сравнению со сланцами Бёрджесс, сохранившимися ископаемыми мягких частей тел животных.

В фауне китайских отложений и в Бёрджесс преобладали членистоногие — великое множество членистоногих. Вскоре они стали самым разнообразным типом живых существ на планете и остаются таковыми по сей день. Одних только жесткокрылых, возможно, существует 30 млн видов!

Эво-дево объясняет это так. Никто не может так просто изменить общее строение организма, как членистоногие. Причины этого перечислены выше Кэрроллом: у членистоногих модульное строение, они обладают избыточной морфологией, что позволяет развивать новые функции, и у них есть серия гомеозисных генов, которые могут обеспечить трансформацию отдельных частей в сегментах целого тела.

Согласно старому подходу возникновение нового животного предполагает обязательное появление новых генов. В этом есть своя логика. Конечно, примитивная губка или медуза имеют меньшее количество генов, чем более развитые членистоногие. Были попытки доказать, что общий предок всех членистоногих как-то приобрел новые гены — новые гомеозисные гены, поскольку именно они являются теми генетическими «включателями», которые дают команду, когда и как формироваться отдельным частям тела. И все же случай здесь другой. Кэрролл и другие ученые продемонстрировали, что общий предок членистоногих не приобретал новых генов: они уже были у него, и благодаря им произошло последующее удивительное развитие всего многообразия существующих видов членистоногих. Как сказал Кэрролл, «эволюция форм заключается не в том, какие гены у вас есть, но в том, как вы их используете».

Всего десять различных гомеозисных генов понадобилось, чтобы совершенно изменить членистоногих и расширить их и без того богатое разнообразие. Их секрет был раскрыт, когда стали сравнивать последовательности белков, специфичных для работы каждого гомеозисного гена, и место каждого белка в развивающемся эмбрионе. Более ранняя мысль о том, что некоторые гены членистоногого кодируют построение конечности, оказалась ошибочной. Гомеозисные гены производят белки. Эти белки затем становятся средством для

запуска и остановки роста определенных участков эмбриона. Некоторые из этих белков отвечают за образование определенных придатков. Если белки каким-то образом перемещаются к другим участкам развивающегося эмбриона, то и конечный продукт также перемещается. В таких случаях конечность, которая должна была образоваться в одном месте тела, может неожиданно появиться в совершенно другом, если, конечно, белок, образованный гомеозисным геном, переместился в эмбрионе задолго до формирования конечности. Новообразования в строении тела возникают от перемещения этих морфологических участков, или зон эмбриона, в котором тот или иной гомеозисный ген может находиться.

Перестановка зон гомеозисных генов в эмбрионе членистоногого привела к возникновению большого разнообразия их видов. Можно найти тысячи, возможно, даже миллионы различных вариантов строения их тел, и все это благодаря лишь десяти генам. Членистоногие представляют собой не что иное, как последовательность повторяющихся сегментов со своими особыми функциями, каждый сегмент и функция соответствуют отдельной зоне гомеозисного гена.

Стивен Гулд и Саймон Конвей Моррис: схема диспропорции

Существует множество предположений о причинах кембрийского взрыва. И много вопросов. Почему не произошло медленного формирования типов животных, а имел место именно резкий, сжатый во времени скачок? Насколько разнообразным был животный мир кембрийского взрыва? Предполагается, что все типы (около 32) ныне существующих животных появились во время кембрийского взрыва, и со времен кембрия не появилось ни одного нового типа животных, и ни один тип полностью не исчез. А были ли в кембрии другие типы, кроме существующих сегодня? Жаркие споры по этому поводу, кульминация которых пришлась на конец 1990-х годов^[120], вели знаменитый биолог-эволюционист Стивен Джей Гулд и ученый из Кембриджа Саймон Конвей Моррис, прославленный британский палеонтолог.

В своей книге *Wonderful Life* («Удивительная жизнь») Гулд утверждал, что кембрийское время было полно «странных чудес» — так он определял виды строения тел, которые существуют и сегодня. С его точки зрения, кембрийский взрыв был именно взрывом, то есть быстрым возникновением новых форм тела, морфологических вариаций и большого количества видов животных. Но вспомним и другое качество такого явления, как взрыв, — они бывают смертельны. Как считает Гулд, на самом деле многие новые формы живых организмов не пережили кембрий. Они «погибли при взрыве», а именно не выдержали конкуренции во время быстрого развития многообразия форм. Было много типов и форм, но далеко не все смогли пройти испытание естественным отбором. Гулд предлагает пирамидальную схему-модель развития морфологического разнообразия животных: широкое основание пирамиды представляет большое и быстрое распространение разнообразных форм жизни, также это явление носит название диспропорции (разнообразие форм, но не видов). Но к концу кембрия, то есть на вершине пирамиды, осталось намного меньше типов, чем было в начале этого периода.

Впрочем, многие исследователи отмечают, что диспропорция на самом деле увеличилась со времен кембрия. Одним из самых известных последователей этой точки зрения является Саймон Конвей Моррис, он находится в оппозиции к точке зрения Гулда. По мнению Морриса, «странные чудеса» вовсе не были отдельными типами животных, а просто ранними и не распознаваемыми в тот момент представителями хорошо известных и ныне живущих типов.

Эта одна из самых горячих научных дискуссий закончилась выводом о том, что, по-видимому, Гулд ошибался. Добавить тут нечего. Но хотя этот спор и утих, новые аспекты кембрийского взрыва выходят на передний план науки, той науки, где в спорах рождается истина.

Новая датировка кембрийского взрыва

Кембрийский взрыв, очевидно, был одним из самых значимых и до недавнего времени наименее изученным из всех основных событий истории развития жизни. Много вопросов вызывала датировка из-за ее неточности, и чем древнее были породы, тем больше была неопределенность датировки. Адам Седжвик, определяя в XVIII веке самый ранний этап кембрия по слоям, в которых появляются трилобиты, не мог знать, что со временем у его собратьев по цеху появится возможность определять реальный возраст пород в годах, а не по окаменелостям (хотя мы уверены, что, по крайней мере, он мечтал о такой возможности). Почти 200 лет точная датировка кембрия была одним из самых обсуждаемых вопросов. И не только время возникновения настоящей «основы» (самого нижнего слоя) подвергалось сомнению (многие верили, и Дарвин в том числе, что под слоем с трилобитами также могут находиться ископаемые животные). На протяжении многих десятилетий XX века стояла проблема определения границы между протерозоем и палеозоем.

Сомнению подвергались все датировки, какая бы граница периодов и эпох ни имелась в виду. К 1960–70-м годам попытки угадать (а это было скорее именно угадывание) время кембрийского взрыва колебались от 600 млн до 500 млн лет назад. Потребовалось разработать невероятно чувствительные и точные радиометрические методики датировки, чтобы дело пошло на лад. Проблема определения периодов заключалась в том, что для получения точных радиометрических данных вулканические породы должны были быть смешаны с осадочными породами в виде пепла, поскольку только вулканический пепел, и то не всякий, содержит минерал циркон (а он, в свою очередь, содержит уран, что и помогает использовать циркон как прекрасные геологические часы). Однако почти нигде на Земле нет пород с такими свойствами, которые бы относились к кембрию.

Пытаясь придумать что-нибудь еще, выдающийся австралийский ученый Уильям Компстон (Австралийский национальный университет в Канберре) разработал метод с использованием изотопов рубидия-стронция в сланцах — осадочных, не вулканических породах. Данные показали, что возраст первых трилобитов в Китае — 610 млн лет. Сейчас нам известно, что его методика была совершенно неверна и что методы с использованием урана — правильный выбор. Тем не менее до 1980-х годов официально считалось, что нижние слои кембрия имеют возраст 570 млн лет, и эта датировка до сих пор присутствует во многих более-менее современных изданиях по геохронологическим вопросам, а также в Интернете.

Впрочем, была и вторая, еще более острая проблема: не «когда», но «что»: что считать первой, а что — последней окаменелостью, отмечающей границы кембрия. Как отмечалось выше, к 1960-м годам палеонтологи усовершенствовали свои методы сбора информации и инструментарий. Все очевиднее становился тот факт, что периоду трилобитов предшествовал приличный этап эволюции животных, включая животных с твердыми частями тела, которые могли оставлять и оставляли окаменелости. Самыми древними окаменелостями твердых частей животных в слоях ниже, чем трилобиты, были крошечные, но вполне различимые частицы раковин («мелкая раковистая фауна»). Некоторые выглядели как крошечные иглы, другие — как маленькие ракушки улиток, а третьи были просто как обломки панциря какого-нибудь древнего моллюска или иглокожего. Но реальный возраст их формирования и существования по-прежнему оставался под вопросом.

В конце концов в начале 1990-х годов международное научное сообщество достигло соглашения^[121]. Первый этап появления животных, то есть вендобионты, был исключен из

кембрийского периода, и период существования этих организмов получил собственное название и отдельное место в геохронологической шкале в протерозойском зоне — эдиакарий. За основу (нижний слой) кембрия приняли породы, содержащие самые первые следы жизнедеятельности животных, над ними, таким образом, оказались представители мелкой раковистой фауны, а выше — трилобиты. И при этом, хотя все вроде и рассортировали, время, когда образовались эти ископаемые, так и осталось неизвестным.

Без надежных радиометрических данных размеры этих слоев — от первых окаменелостей до трилобитов — для некоторых регионов планеты могут измеряться десятками тысяч метров. Это подразумевает миллионы лет, но масс-спектрографы (инструменты, определяющие возраст пород) до 1980-х годов мало использовались. Однако технологии развивались, и к концу 1980-х годов новые типы масс-спектрографов начали применять при изучении редких, но очень важных с научной точки зрения вулканических отложений: тех, что время от времени обнаруживались в осадочных породах, которые считались кембрийскими. Одно такое место было открыто спустя много лет после того, как Седжвик воспарил к небесам (или ушел к ископаемым, мы не знаем, куда попадают после смерти палеонтологи), оно находится в Марокко. Эта находка послужила ключом к определению возраста четырех этапов кембрийского взрыва.

Неизвестные сюрпризы кембрийского взрыва

В конце 1980-х годов один из соавторов данной книги, Джо Киршвинк, собрал образцы вулканического пепла в Атласских горах в Марокко. Слой пепла был в этом отложении осадочных пород на 50 м ниже первых кембрийских ископаемых трилобитов. Но как долго формировался этот слой? К сожалению, этот вулканический пепел содержал совсем небольшое количество циркона, слишком мало, чтобы использовать обычные для тех лет методики датировки. Однако к тому времени Компстон уже разработал замечательный метод, известный как ионная микроскопия сверхвысокого разрешения: пучок ионов цезия направляется на малый участок частицы минерала. Плазма, генерируемая в этом процессе, проводится в масс-спектрометр, и несколько тонких манипуляций позволяют получить чрезвычайно точные сведения датировки по урану/свинцу.

Результаты были потрясающими. Данные, полученные для собранных в Марокко образцов, показывали возраст не старше 520 млн лет, и уж точно не старше 600 млн лет!^[122] Компстон сделал все возможное, чтобы удостовериться в возрастных характеристиках, но данные лишь подтвердились: в датировке нижнего слоя кембрия была ошибка в 80 млн лет. Это означало, что кембрийский взрыв — по крайней мере, развитие большого разнообразия типов животных, наблюдаемое с появлением мелкой раковистой фауны, — скорее напоминал ядерный взрыв, поскольку проходил в 25 раз быстрее, чем предполагалось до этого. Коллеги из Массачусетского технологического института (знаменитый Сэм Боуринг) и другие исследователи вскоре повторили эксперименты Компстона с образцами вулканического пепла из других экзотических мест, например, из Намибии и северной части Анабарского плато в Якутии^[123]. Таким образом, появилась дата возникновения трилобитов, и она оказалась намного более ранней, чем предполагали раньше. Палеонтологи запаниковали, так как подумали, что весь кембрийский период займет не более 10 млн лет, поэтому они отказались от трилобитов как своей путеводной звезды и сосредоточились на более древнем событии — появлении первых следов жизнедеятельности, которые в конце концов были датированы примерно 542 млн лет назад. Оказывается, необычный период эволюции, когда происходило множество изменений и появлялось много нового, имел и другие, не менее необычные характеристики. Исследования изотопов углерода в пограничных слоях между протерозоем и кембрием показывают, что в те времена происходило что-то очень странное, события следовали очень неравномерно, как кардиограмма, и продолжалось это сотни миллионов лет (теперь эти явления называются кембрийскими углеродными циклами)^[124]. Размах этих событий огромен, равен почти полному сгоранию всей существующей на планете биомассы каждые несколько миллионов лет. Либо это, либо что-то еще привело к образованию очень легкого углерода (который можно обнаружить в метане), который врывался в атмосферу в огромных количествах со всеми парниковыми последствиями. Испытала ли Земля цепь кратких периодов тепловых катастроф? Впрочем, такие события привели бы к вымиранию, но не развитию многообразия.

Кембрий, помимо прочего, давно известен еще одной странностью: он является одним из периодов самой значительной тектонической активности и смещения плит (плита — это огромный участок земной коры, который двигается, сталкивается с другими плитами или распадается на более мелкие части). Тектоническое движение можно отследить, если применить метод палеомагнетизма, позволяющий определить древние широтные характеристики пород и направление движения плит. Именно благодаря этому методу Джо Киршвинк впервые определил периоды «Земли-снежка». Новые методы палеомагнетического

анализа показывают как будто невозможное: тектонические плиты курсируют по поверхности Земли с бешеной скоростью, весь мир быстро перемещается относительно полюсов, Северный и Южный полюса остаются там, где им и полагается быть, а под ними вращается земной шар.

Примером может служить Австралия: согласно полученным данным, когда-то этот континент находился у самого экватора и в кембрийский период повернулся почти на 70° по часовой стрелке — менее чем за 10 млн лет, может, и за более короткое время. Впрочем, поскольку Австралия была частью суперконтинента Гондвана, в который также входили Антарктида, большая часть Индии, Мадагаскар, Африка и Южная Америка, поворот Австралии означал и перемещение больше половины всей земной поверхности того времени. Сегодня сведения исследователей Гондваны это подтверждают: суперконтинент поворачивался против часовой стрелки точно в период кембрийского взрыва, 530–520 млн лет назад. Подобная информация получена и о североамериканской континентальной платформе Лауренция: она двигалась от холодного Южного полюса к экватору примерно в то же время.

Простота — сестра таланта, поэтому, проще говоря, не группа малых тектонических плит двигалась куда-то, а все на планете перемещалось относительно оси. Следует отметить, что эта формулировка оправдана, только если Лауренция и Австралия находились в тот период времени примерно в 90° друг от друга (а это было именно так, ведь Австралия была у экватора, а Лауренция на полюсе!). На самом деле эта упрощенная теория всеобщего взаимного вращения и перемещения ведет к довольно специфичным предварительным выводам об относительной ориентации в пространстве и очертаниях континентов, к «абсолютизированной палеогеографии». Приносим свои извинения Толкину, но выглядит это примерно так: «Одно движение переместит их, одно вращение повернет их, одно смещение от полюса для них — на одном общем земном шаре!»^[125] Общее вращение всей коры планеты вокруг оси приводит около 90 % всех разрозненных до этого результатов палеомагнетизма к единому фокусу.

Все происходило одновременно. Мощный пульс эволюции, проявленный и в численности видов, и в количестве морфологических типов, громадное увеличение биоминерализации (количества и разнообразия видов скелета, развившихся у многих типов животных), первые взаимоотношения между хищниками и жертвами у животных, огромные скачки количества органического углерода, безумные перемещения континентов — все это заставляет ученых, включая Киршвинка и его студентов, лишь гадать, являются ли эти события совпадениями или между ними есть причинно-следственные связи.

С появлением новых данных палеомагнетизма были установлены не только удивительные, но и просто невероятные перемещения древних плит. Концепция униформизма предлагает использовать настоящее, чтобы понять прошлое, и мы с готовностью принимаем это предложение — определяем скорость современного движения континентов. В Атлантическом океане, где в данный момент формируется новая океаническая кора вдоль Средне-Атлантического хребта, скорость, с которой две плиты расходятся к северу и югу от своей когда-то общей границы, составляет около 2,5 см в год. Эти две огромные плиты держат на себе континенты, и куда двигаются плиты, туда же устремляются и их материковые части. Скорости бывают разные. Например, сегодня тихоокеанские плиты двигаются намного быстрее, около 7–12 см в год. Самый быстрый темп — около 25 см в год, но это в теории, и то под сомнением. В то же время данные палеомагнетических исследований показывают, что возможны скорости в несколько *метров* в год, а для тектонических плит это кажется невозможным. Однако данные повторяются и

представляются окончательными. Происходило явно что-то по-настоящему революционное или, по крайней мере, нечто, настолько отличное от современных процессов, что науке приходится лишь удивляться. Для принципов униформизма это слишком!

Первой реакцией на сведения, показывающие столь быстрое движение поверхностных участков планеты, было сомнение в объективности этих данных. Что ж, вполне справедливо. Как сказал однажды Карл Саган, неординарные (научные) утверждения требуют неординарных доказательств. Перемещение континентов было настолько быстрым, что нормальное тектоническое движение, упомянутое выше, то есть не более нескольких сантиметров в год, не может служить основой для изучения этого явления. Новые данные, медленно, но упорно собираемые Киршвинком и другими коллегами, демонстрировали слишком быстрое движение плит, чтобы его можно было объяснить с помощью принятой сегодня тектонической теории. Ну и наконец, основные процессы этого быстрого тектонического движения совпадали по времени с бурным развитием многообразия типов животных. Если на кембрийский взрыв повлияло не быстрое тектоническое движение, то что? И каким образом оно могло повлиять на эволюцию животных?

Ответы явились настоящим откровением, хотя и не должны были особенно удивить, поскольку схожие процессы известны по результатам изучения истории формирования и развития Марса, Луны и многих спутников и малых планет. Эти объекты вполне способны к необыкновенным изменениям в пространственной ориентации. Невозможно до конца оценить все последствия подобных процессов для эволюции живых организмов на Земле, но наше новое понимание того, что же на самом деле произошло, поистине сравнимо с революцией в науке о развитии жизни на нашей планете.

Уже более века геофизики знают, что участки земной коры могут быстро перемещаться относительно оси. Существует физический закон, который гласит, что вращающийся объект будет вращаться вокруг так называемого момента инерции. Хорошим примером может служить летающий диск, фрисби: если его запустить правильно, он будет вращаться вокруг своего центра, и масса вещества на его краях будет поддерживать стабильность вращения. Но давайте прилепим на диск кусочек свинца, но не в центр. Вращение фрисби изменится, поскольку он попытается переориентировать движение с учетом новой массы так, чтобы новообразовавшийся тяжелый участок оказался как можно дальше от центра вращения — у «экватора». На вращающейся планете центробежные и гравитационные силы влияют на любой появившийся на поверхности объект. Но на вращающемся шаре переориентация может происходить по-своему, и под влиянием оси вращения новый «вес», который находился, скажем, в двух третьих пути от экватора к полюсу, может в конечном итоге оказаться и не на экваторе. Крутящийся мяч может изменить позицию оси вращения, если на него прилепить посторонний объект.

Хорошо известно, что Луна и Марс переориентировались таким образом в течение своей геологической истории. На поверхностях обоих появлялись участки с новой массой, которые первоначально находились не на экваторе, но в конце концов оказались именно там. Например, гигантская провинция Фарсида (геологический регион Марса) состоит из огромного количества лавы с очень большой массой. С позиции геологического времени это похоже на посторонний объект, который мы прилепили на фрисби или на вращающийся мяч, так как провинция появилась уже после окончательного образования Марса. На самом деле это крупнейшая положительная гравитационная аномалия в Солнечной системе, и находится она точно на марсианском экваторе — сегодня находится. На Луне наблюдения, предшествующие работе «Аполлона», зафиксировали концентрации больших масс, обусловленных базальтовыми лавами, покрывающими лунные моря, и тоже — на экваторе.

Эти процессы вполне объяснимы для Марса и Луны, поскольку ни один из этих объектов не имеет тектоники плит, и называются эти процессы истинным перемещением полюсов (*true polar wander* — *TPW*). До открытия тектоники плит в 1966 году все свидетельства того, что земные полюса в древности находились в других местах, приписывались действию истинного перемещения полюсов.

Быстрое по геологическим меркам изменение массы отдельных участков планеты может происходить по разным причинам, включая воздействие кометы или большого астероида, или извержение магмы из недр на поверхность Земли.

Кроме того, большие изменения массы могут возникать, если какая-либо часть тектонической плиты появляется или, наоборот, исчезает в зоне расширения или в зоне движения по разломам. Любая из этих причин достаточно весома, чтобы существенно влиять на истинное перемещение полюсов на Земле. Исчезновение участков влияет на ориентацию всей планеты. Могут исчезать и зоны расширения, и зоны движения, когда один дрейфующий континент сталкивается с другим. Любые океанические зоны расширения или движения между сходящимися континентами разрушаются при столкновении. В этом случае мы имеем дело с переориентацией планеты, вызванной не появлением дополнительной массы на поверхности планеты, но в связи с ее исчезновением.

Маловероятно, чтобы биологические изменения, связанные с кембрийским взрывом, повлияли на тектоническое движение, более вероятно, что быстрое движение плит существенно ускорило ход биологической эволюции. Это предположение можно доказать, основываясь на нескольких новых открытиях. Во-первых, когда материки находились в более высоких широтах, в их полостях накапливалось много замерзшего метана (клатрата, или газового гидрата), на морском дне и в вечной мерзлоте. По мере продвижения к экватору они постепенно согревались, и происходили периодические выбросы парниковых газов в атмосферу, что приводило к согреванию среды. Эволюция, в том числе многообразие видов, ускоряет свое развитие в первую очередь именно в теплой среде, поскольку ускоряется метаболизм.

Когда описанные выше явления впервые стали упоминаться в научной литературе, их называли «метановое вливание в кембрийский взрыв», и считалось, что температурные режимы, возможно, были основным фактором быстрого развития видов животных. Также это признавалось возможной причиной скачкообразных изменений изотопов углерода.

В том числе оказывается, что наибольшее разнообразие видов географически привязано именно к экватору. Когда наш коллега из Йельского университета Росс Митчелл изучил палеографические перемещения во время истинного перемещения полюсов, он заметил, что почти все новые группы животных появлялись в тех частях материков, которые во время движения были обращены к экватору, и лишь совсем незначительное количество видов появилось в более высоких широтах. Эта связь быстрого увеличения количества форм живых организмов и географии дает потрясающе простое объяснение бурному развитию видов, особенно в отношении экспериментов природы с гомеозисными генами. Кроме того, палеонтологическую летопись кембрийского взрыва можно отчасти принимать за свидетельство геологических изменений, так как побочным эффектом истинного перемещения полюсов являлись повышение уровня моря в областях,двигающихся к экватору, и понижение уровня моря на тех участках, которые двигались от него. Осадочные отложения лучше всего накапливаются при повышении уровня моря, а при понижении уровня они постепенно исчезают. Значит, породы, образовавшиеся во время истинного перемещения полюсов, отражают увеличение разнообразия животных.

Утверждение того факта, что истинное перемещение полюсов является причиной

важных событий в истории развития жизни, определенно открывает новое поле для исследований, о котором в XX веке даже не помышляли. Как истинное перемещение полюсов используется для объяснения событий кембрийского взрыва, так же его можно применить для объяснения массовых вымираний. Одно из которых, кстати сказать, стало завершающим этапом кембрийского периода — в это время вымерли почти все «странные чудеса» Стивена Гулда из сланцев Бёрджесс, — и получило в качестве названия непонятное слово SPICE^[126].

Окончание кембрия: SPICE и первое фанерозойское массовое вымирание

Любое описание кембрийского взрыва не обходится без восторгов по поводу той мощи и значимости, с которой эволюция творила разнообразие типов организмов в то время. Этот период характеризуется глубочайшими изменениями мировой биоты — от неспособных к самостоятельному передвижению, свободно дрейфующих и просто более крупных по сравнению с докембрием форм к пышному расцвету многочисленных и многообразных живых организмов в конце кембрия. Но почему кембрий вообще закончился? Ответ на этот вопрос переворачивает все более ранние представления исследователей этого периода.

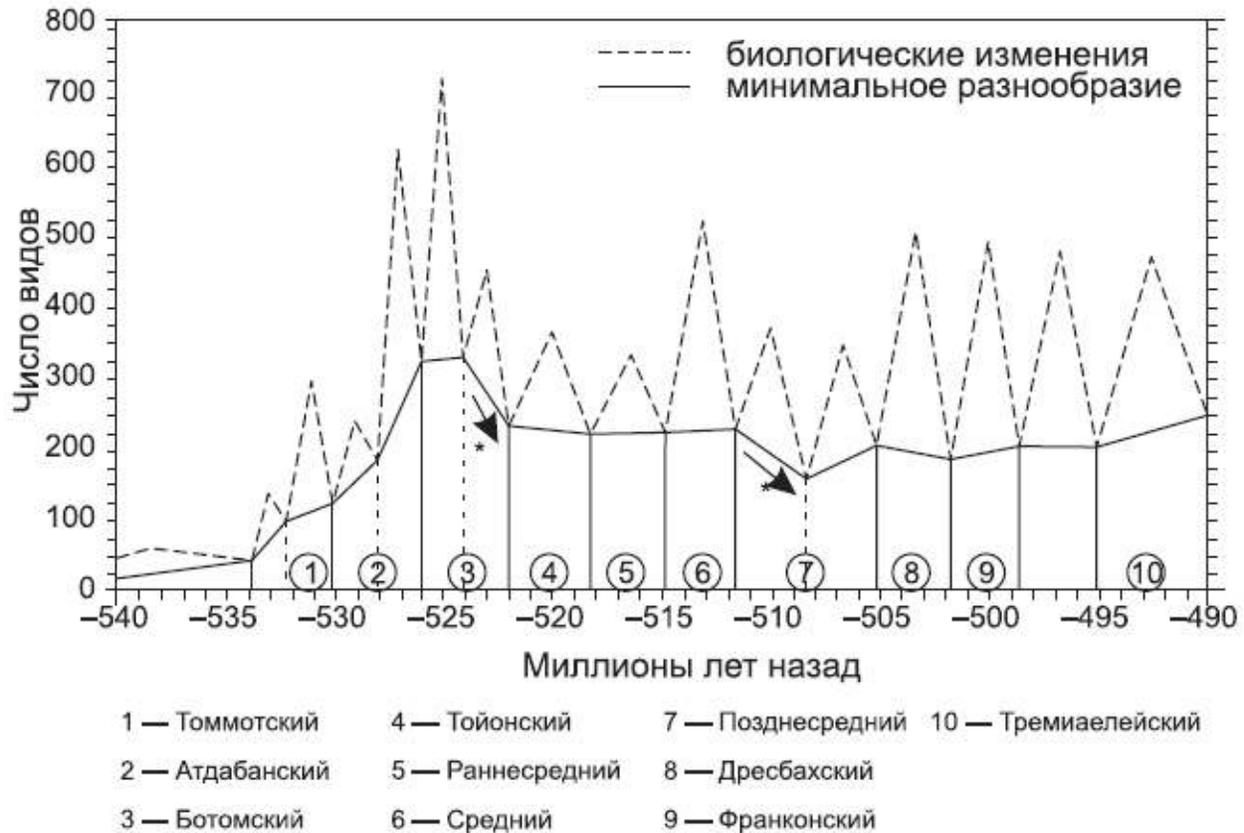
Массовые вымирания, краткие периоды высокой смертности среди как отдельных видов, так и целых групп различались по степени тяжести. Крупнейшие, включая «большую пятерку», предполагают вымирание по меньшей мере 50 % всех видов. Но были и другие вымирания, менее катастрофические (но только не для тех, кто вымер). Одним из самых знаменитых в этом роде было вымирание в конце кембрийского периода.

Массовое вымирание в конце кембрия состояло на самом деле из трех или четырех отдельных малых вымираний, в основном затронувших трилобитов и других морских беспозвоночных, особенно плеченогих. Считается, что причиной послужило изменение климата. Одни из самых древних трилобитов — оленеллиды — вымерли полностью, и вообще, изменилась вся природа трилобитов. Тела кембрийских трилобитов состояли из множества сегментов, глаза были примитивны, и у этих существ не было никакой очевидной защиты от хищников, например, шипов или игл. Также трилобиты того периода не могли сворачиваться в плотный шар, как это делают современные мокрицы, если ощущают опасность. После этапа вымирания, то есть в раннем ордовикском периоде, новые формы трилобитов имели совершенно иное строение тела: почти у всех сократилось число сегментов (многочисленные сегменты позволяют хищникам легче пробивать верхние покровы, чем немногие, но более крупные сегменты), у них появились более развитые глаза, защитные панцири, и, что особенно примечательно, они приобрели способность сворачиваться.

Теплая среда обитания, низкий уровень кислорода, изменения фауны — вот мир, в котором происходили вымирания позднего кембрийского периода. Но затем были получены данные, которые говорили о прямо противоположном: вода была холодной, в океанах находилось много органических отходов, что приводило к бурному увеличению уровня кислорода в среде. Эти явления в совокупности получили название SPICE — кембрийский положительный сдвиг изотопа углерода. Однако существует серьезное противоречие тому, о чем свидетельствует открытие явлений SPICE. Впервые признаки SPICE были обнаружены в породах не только благодаря свидетельствам внезапного вымирания видов, но и как большое отклонение соотношения изотопов углерода в отложениях, а значит, и в цикле углеродного питания. Достоверные факты говорят о том, что большое количество трилобитов исчезло в результате последовательных кратких периодов вымирания в конце кембрия.

Один из интереснейших аспектов SPICE заключается в том, что, в отличие от прочих случаев массового вымирания, этот скорее всего сопровождался не падением, но, наоборот, большим, хотя и кратковременным повышением уровня кислорода. Так волнительно воображать, как какое-нибудь вулканическое извержение того времени спровоцировало кратковременное движение континентов, описанное выше, — истинное перемещение полюсов. В этом случае больше областей суши переместилось к тропикам за несколько

миллионов лет, углерода стало меньше, а кислорода в атмосфере — больше. Что-то в этом роде вполне могло открыть путь для последующего расцвета жизненных форм уже после кембрийского взрыва. Например, коралловым рифам требуется очень много кислорода: они, кстати, и возникли вскоре после периода SPICE, открыв тем самым новый геологический период — ордовик.



Биологические изменения и генетическое разнообразие во время кембрийского периода. Классическое представление о временных рамках кембрийского взрыва охватывает ярусы томмотский, агдабанский, ботомский Сибирской платформы. Линия изменения фауны показывает число видов, которые появились/исчезли в течение определенного интервала. (Из книги Bambach et al., *Origination, Extinction, and Mass Depletions of Marine Diversity*, *Paleontology* 30 (2004): 522–42 («Происхождение, вымирание и резкие уменьшения разнообразия морских существ»))

Глава 9

Ордовикский и девонский периоды: 500–360 миллионов лет назад

Современные коралловые рифы называют тропическими лесами океана, поскольку рифы, как и тропические леса, отличаются огромным разнообразием видов и многочисленностью популяций, при этом на относительно небольших территориях, — там царит богатство и изобилие жизненных форм. Но на этом сходство заканчивается. В тропическом лесу (вообще, в любом лесу) большинство форм жизни относится к растениям. В коралловых рифах, наоборот, жизнь почти полностью представлена царством животных. На рифах можно увидеть множество существ, очень *похожих* на растения своими формами, — в виде листьев или кустов. Но все они — животные: от кораллов и губок до кружевных мшанок. Можно, конечно, утверждать, что способные к фотосинтезу зеленеющие просторы, покрывающие огромные пространства земных континентов, есть самое очевидное и видимое даже из космоса доказательство того, что наша планета — мир жизни. Но есть еще один биологический сигнал подобного свойства, и тоже очень хорошо видный из космоса, но в морях — присутствие в тропиках коралловых рифов. Большой барьерный риф, который тянется более чем на тысячу километров вдоль восточного побережья Австралии, — яркое тому подтверждение. А ведь есть и другие, не менее прекрасные рифы. В экваториальных водах находятся многочисленные коралловые атоллы, береговые рифы, а также широкие бирюзовые лагуны, образованные данными полностью биологическими структурами. Эти рифы являются частью очень древних видов экосистем, древнее лесов и уж точно древнее любой наземной формы жизни. При этом они остаются одной из самых насыщенных разнородными обитателями средой обитания, в их основе — жизнедеятельность организмов, которые выжили после всех массовых вымираний и планетарных катастроф, случившихся за последние 540 млн лет.

Отличительной особенностью среды кораллового рифа является обилие разнообразного движения: стайки рыб, заметное движение волн, покачивание мягких кораллов — постоянный пульс живого рифового пространства. Любой коралловый риф — обиталище многочисленных рыб самых разных видов, размеров, форм и поведения. Одни плавают стаями, другие прячутся, третьи перемещаются в гордом одиночестве, а некоторые — вездесущие акулы — патрулируют район. И не только позвоночные обитают и постоянно двигаются здесь. Более пристальный взгляд покажет, что и беспозвоночных тут тоже великое множество, хотя они и двигаются медленнее рыб. От коралла к кораллу порхают креветки, ползают в постоянном поиске пищи большие и малые крабы. Еще более медлительные улитки ползут куда-то по своим делам, и вообще, брюхоногие здесь весьма разнообразны: есть и большие плотоядные виды, а есть и травоядные, хотя такие же большие. У дна кораллового рифа, по крайней мере дном, неспешно пасутся прекрасные моллюски-каури, поедая частички водорослей, а между ними перемещаются их свирепые соседи с раковинами конической формы в поисках своей обычной добычи — маленьких червей. Впрочем, некоторые, например, моллюски-конусы, едят рыбу и для охоты используют своеобразный зуб, формой напоминающий гарпун, к тому же ядовитый, которым они протыкают жертву, а затем поглощают ее целиком. Пухлые морские огурцы, передвигаясь по осевшим органическим остаткам или, скорее, под ними, без усталости перерабатывают массы песка, всасывая их ротовым отверстием и выплевывая песчаные шарики с другой стороны своего

тела. С ними соседствуют морские ежи. Здесь есть и другие иглокожие — от хищных морских звезд до миролюбивых морских лилий. Все эти существа — большое, многоцветное и разнообразное, особенно по способу передвижения, сообщество видов. Современные коралловые рифы полны движения и цвета, и есть все основания полагать, что так было всегда.

Рифы действительно очень древнее изобретение эволюции^[127], а становление их величия отражает путь к богатому многообразию жизненных форм, которое возникло уже после кембрийского взрыва. В некотором роде здесь уместно сравнение с водородной бомбой. Термоядерная реакция и мощная вспышка возможны только при огромной температуре атомного взрыва. Водородная бомба работает так: срабатывает ядерный заряд с плутонием, это приводит к выделению теплоты и давления, достаточных для начала термоядерной реакции, и — взрыва. Так и кембрийский взрыв биологического разнообразия позволил развиваться еще большему разнообразию в ордовике, а одним из самых значительных результатов этой биологической реакции стало появление коралловых рифов.

Возникновение первых рифов (под рифами мы понимаем устойчивые к воздействию волн трехмерные структуры, созданные живыми организмами) относится к раннему кембрию. Это не были коралловые рифы, их создавали давно вымершие губки археоциаты (*Archaeocyatha*)^[128]. Коралловые рифы немного моложе, первые из них появились в ордовикский период, а к девонскому периоду они уже по-настоящему разрослись как в размерах, так и по месту распространения, а также по степени многообразия форм. Они оставались весьма постоянными и хорошо различимыми экосистемами вплоть до конца пермского периода, когда не только рифы, но и многие другие виды погибли во время пермского массового вымирания.

Давайте представим себе, что нам удалось вернуться во времени на 400 млн лет назад и нырнуть к палеозойскому коралловому рифу. На первый взгляд, тут удивительно много общего с современным коралловым рифом. Во-первых, везде кораллы. Это «кирпичики» трехмерного рифового пространства, соединенные биологическим строительным раствором, — покрытые твердым веществом существа, которые скрепляют и соединяют в одно целое стволы и ветви коралла в огромные сложные известковые нагромождения. Однако, если присмотреться, коралловые сообщества 400 млн лет назад выглядели совершенно иначе и по внешним признакам, и по таксономическому составу: массивные коралловые образования были построены семейством, которое, возможно, и создавало наросты, похожие на сегодняшние, но весьма отличалось по своей биологической морфологии. Это были табулятные кораллы (*tabulata*), они занимали биологическую нишу, которую сегодня занимают каменистые кораллы (*scleractinia*) — обычные представители нынешних рифов. Среди этих широко раскинувшихся табулятных кораллов, похожих на полукруглые шапки, можно увидеть и других «застройщиков», другие «кирпичики». Многие из них являются строматопороидами (*stromatoporoidea*) — странными губками, которые производят карбонатные соли. Они встречаются и сегодня, но уже не в таких количествах и не в такой многообразии, как во времена палеозоя. Тут и там можно встретить еще одну разновидность коралла, одиночного по своей природе, — ругозу (*rugosa*), представители которой похожи на бычьи рога, только острый конец известкового рога прикреплен к какой-нибудь поверхности, а широкий конец поднимается вверх и является местом, где и сидит это странное, похожее на актинию существо.

Как и современные каменистые кораллы, независимо от размера, а также количества маленьких тел со щупальцами (что и является основным морфологическим типом всех кораллов), табулятные кораллы были «единым» организмом, по крайней мере генетически. На

самом деле все кораллы наверняка тогда, как и сейчас, представляли собой *колонии* крошечных актиниевидных полипов, каждый из них — это венчик ядовитых щупалец, окружающих ротовое отверстие. Но в отличие от актиний (тоже полипов, только одиночных), которые могут покрывать большие участки подводных скал, всякий коралловый полип связан с другими вокруг него тонким участком живой ткани-мембраны. Любая из частей этих, подчас очень обширных, колоний генетически идентична другим частям. Но это не просто одно живое существо. В действительности на мембране кораллов можно обнаружить еще большое количество разнообразной растительной жизни: и в соединительных мембранах, и на самом полипе живет невообразимое множество мельчайших растений — одноклеточных динофитовых водорослей, которые находятся с кораллами в симбиозе. Это очень выгодное сожительство: растения получают четыре наиболее необходимые для них вещи — свет, углекислый газ, пищевые ресурсы (фосфаты и нитраты) и защиту в коралловых зарослях от любителей полакомиться вкусными, хотя и крошечными растениями.

Кембрийский фундамент: развитие многообразия видов в ордовикском периоде

Кембрийский период закончился массовым вымиранием, которое затронуло многих процветающих представителей кембрийской фауны: морских обитателей, ставших ранними представителями животного царства в истории — трилобитов, плеченогих, а также многих экзотических существ из сланцев Бёрджесс, например, аномалокарисов (*Anomalocaris*). Впрочем, в 2010 году был обнаружен ряд новых ископаемых ордовикского периода, в которых были и представители аномалокариса, самые поздние из всех, поэтому можно думать, что кембрийское вымирание оказалось добрее к некоторым необычным формам Бёрджесса, чем это полагалось ранее. Кембрийское вымирание известно давно, но никогда не значилось как крупное — в тот период погибло менее 50 % морских форм. Но это событие подействовало на развитие многообразия видов как порция бензина на угасающий костер, поскольку, возможно, вымерли менее приспособленные виды, открыв дорогу новинкам эволюции: представим себе сад — без сорняков бурно разрастаются культурные растения.

Необходимо также учесть, что для биологического мира открылись совершенно новые среды обитания для животных и растений, которые были слабо заселены в кембрии. Солоноватые воды, пресноводные водоемы, более глубокие и, наоборот, более мелкие по сравнению с обиталищем кембрийской фауны области моря, зона прибоя — все эти места «дозрели» до освоения их живыми существами. Многие из этих существ по-прежнему были сидячими — проводили всю свою жизнь, прикрепившись к одному месту и фильтруя морскую воду, к тому времени уже более богатую планктоном. Но появлялись новые виды, и объем биомассы также возрастал^[129].

В ордовике возникло немало видов животных, которых не было в кембрии, и многие из них появились сразу после окончания кембрийского массового вымирания. Результатом было распространение форм, чрезвычайно отличных от представителей кембрийской фауны. Все еще существовали трилобиты, но по сравнению с кембрийскими океанами, где они присутствовали в подавляющем большинстве на различных глубинах, их превзошли и числом, и разнообразием животные с раковинами — плеченогие и множество моллюсков. Несомненными победителями в эволюционной гонке того времени стали животные с абсолютно новым образом жизни — те, что образовывали колонии. Хотя до этого формирование колоний было характерно для некоторых более простых организмов, включая многие виды растений, микробов и простейших, в ордовике проживание колониями стало основным направлением развития, которое привело к неослабевающей динамике разнообразия видов, чем особо и отмечен ордовикский период: кораллы, мшанки, новые виды губок и много-много других.

Рассмотрение причин этого взрыва разнообразия снова возвращает нас к проблеме кислорода^[130]. По нашему мнению, в данном случае наблюдается истинная картина того, как влияло насыщение океанов кислородом. И тут необходимо сделать пояснение в традициях исторической науки — относительно новое толкование явлений, которое хотя и не является откровением, но тем не менее обладает объяснительной силой. Кроме того, оно позволяет сделать краткий обзор разнообразия животных, что вполне уместно именно в этой части книги. Мы докажем, что именно уровень кислорода в среде, и ничто другое, был тем фактором, который подарил нам разнообразие видов животных.

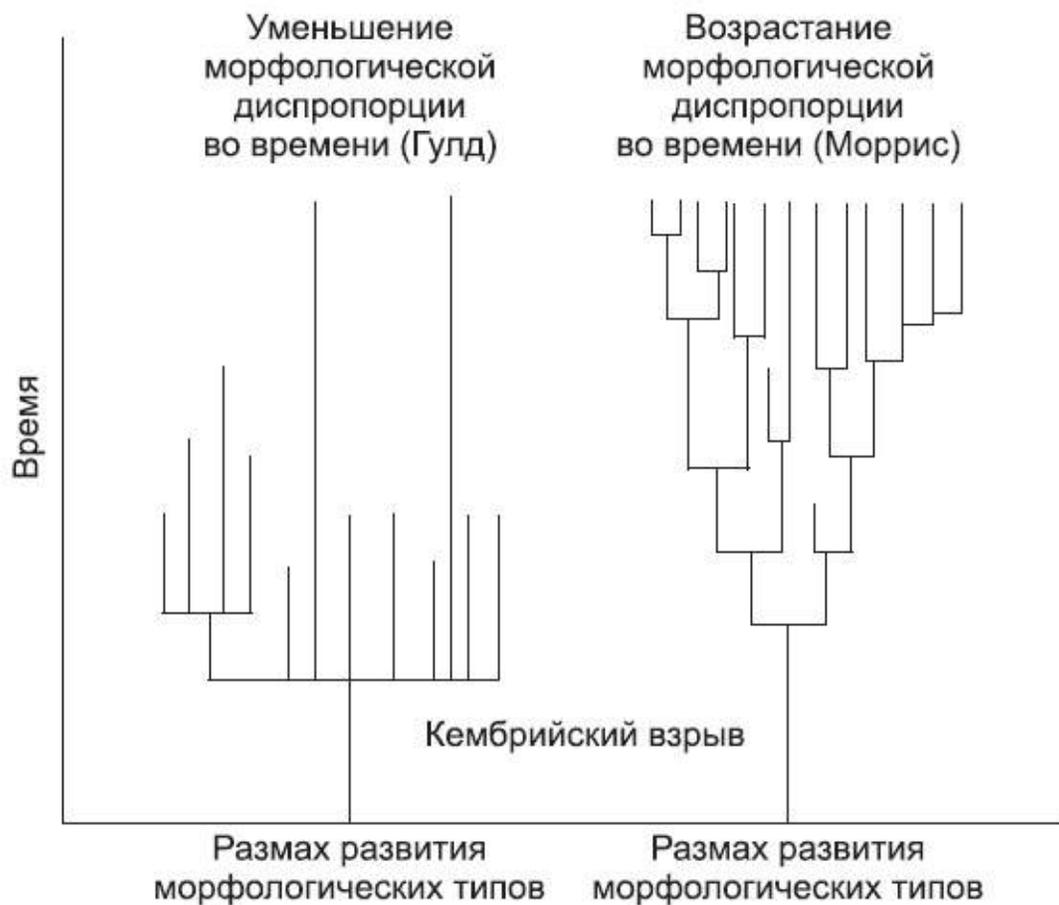
Ордовикский период может рассматриваться как вторая часть двухчастной инициации развития разнообразия животных на Земле (первой был кембрийский взрыв^[131]), и в обоих

случаях спусковым механизмом служило увеличение содержания кислорода в окружающей среде. Как и в кембрии, в ордовикский период появились новые виды, а также новые типы строения тела, причем процесс шел быстрее, чем предыдущие периоды. Быстрая эволюция и нововведения частично обусловили то, что мир наполнился живыми существами. История развития жизни в кембрийском периоде характеризуется множеством эволюционных экспериментов в морских водах. После кембрия многие из этих ранних, откровенно примитивных и неэффективных эволюционных проектов были заменены всплеском разнообразия, поскольку отбор безжалостно убивал менее живучие формы. Эволюция явилась своего рода конкурсом инженерных инноваций в области усовершенствования строения тела.

История об истории биоразнообразия

Биологическое разнообразие характеризуется известным числом и номенклатурой различных категорий организмов, особенно животных, поскольку последние оставляют наиболее заметные и многочисленные окаменелости. Впервые история развития биоразнообразия была опубликована геологом Джоном Филлипсом, который также ввел в геохронологическую шкалу понятия «палеозой», «мезозой» и «кайнозой». Филлипс, чей фундаментальный труд вышел в 1860 году, не просто дал определения этим новым понятиям, но смог распознать в известной тогда геологической летописи крупнейшие геологические периоды: он понял, что крупные массовые вымирания древности могут использоваться для разграничения геологических эпох, так как последствия каждого вымирания приводили к появлению новой фауны. Впрочем, это не единственная заслуга Филлипса. Он также утверждал, что разнообразие видов в прошлом было намного меньше, чем сейчас, и что развитие биоразнообразия — непрерывный и всеобъемлющий рост числа видов, за исключением периодов массовых вымираний и непосредственно после них. Согласно его теории, массовые вымирания приостанавливали развитие разнообразия, но лишь временно. Взгляды Филлипса были по тем временам новаторскими. К сожалению, прошло столетие, прежде чем эта тема снова заинтересовала исследователей.

В конце 1960-х годов палеонтологи Норман Ньюелл и Джеймс Валентайн снова обратились к проблеме того, когда именно и с какой скоростью мир был заселен растениями и животными^[132]. Обоим интересовало, действительно ли схема развития биоразнообразия представляла собой быстрый рост количества и разнообразия видов вслед за так называемым кембрийским взрывом около 530–520 млн лет назад (имеются в виду новые данные, а не те, что были приняты в 1960-х), а затем — относительно спокойный период. Их аргументы покоились на качестве сохранности материала в древних породах. Возможно, паттерн динамики разнообразия во времени, построенный Филлипсом, в действительности отражал лишь то, что *сохранилось*, а не *реальную* картину развития биоразнообразия. Изменения в видовом составе очевидно меньше отражены в любых более древних породах, поэтому так называемое биоразнообразие может быть просто ошибкой. Эту мысль вскоре подхватил палеонтолог Дэвид Рауп: в ряде статей^[133] он настаивал, что существуют серьезные возражения против классификации обнаруженных и получивших название древних видов: древние породы подверглись большей перекристаллизации, провалам и прочим изменениям, целые регионы и биогеографические области со временем просто исчезли, и вместе с ними исчезла и более древняя геологическая летопись, то есть сейчас просто исследуются более молодые породы.



Противоположные гипотезы о диспропорции и кембрийском взрыве. «Разнообразие» относится к числу видов, тогда как «диспропорция» — к числу различных морфологических типов, анатомии. Стивен Джей Гулд считал, что во времена кембрийского взрыва наблюдалось гораздо большее (большая диспропорция) количество типов в строении тела, чем сейчас. Он ссылаясь на многообразие странных форм из сланцев Бёрджесс, называя их «странными чудесами», и полагал, что они относятся к типам, которые сегодня являются полностью вымершими. Противоположная точка зрения принадлежит Саймону Конвею Моррису, который утверждал, что диспропорция со временем усиливается.

Всю вторую половину XX века палеонтологи выясняли, что же происходило: постоянное быстрое развитие разнообразия видов или их развитие, стремительно достигнув какого-то определенного уровня, обрело устойчивый средний показатель скорости. В 1970-х годах Рауп, а также покойный Джек Сепкоски^[134] из Чикагского университета вместе с коллегами и студентами начали активный сбор данных, накопившихся в библиотеках. Полученные данные о морских беспозвоночных, а также прочие сведения о наземных растениях и позвоночных животных вроде бы подтверждали точку зрения Филлипса: особенно кривые, построенные Сепкоски, которые показали поразительную вещь — три импульса в развитии биоразнообразия среди различных групп организмов.

Первый импульс прослеживался в кембрии (кембрийская фауна, в которую входили трилобиты, плеченогие и прочие древние беспозвоночные). За ним следовал второй — в ордовике, когда наблюдался относительно спокойный рост биомассы, и так продолжалось до конца палеозойской эры (палеозойская фауна — кораллы, замковые плеченогие, головоногие, древние иглокожие). Кульминацией стало быстрое развитие видов в мезозое, которое лишь ускорилось в кайнозое, разнообразие достигло высоких уровней, что мы и наблюдаем сегодня как результаты эволюции современной фауны (брюхоногие и двустворчатые моллюски, большая часть позвоночных, современные иглокожие и другие

группы).

В чистом виде развитие биоразнообразия за последние 500 млн лет соответствовало гипотезе, представленной Джоном Филлипсом в 1860 году: на планете сейчас больше видов, чем было когда-либо в прошлом. Кроме того, что еще более утешительно, траектория развития разнообразия видов показывает, что, по-видимому, «моторчик» эволюции — процессы, отвечающие за возникновение новых видов, — неизменно работает, и в будущем можно ожидать появления на Земле еще большего разнообразия форм. В любом астробиологическом контексте эти данные свидетельствуют о том, что наша планета по-прежнему молода. Как бы то ни было, научный взгляд, имеющий 130-летнюю историю, от Филлипса до Сепкоски, очень успокаивает — сейчас видов больше, чем в прошлом, то есть вековая научная теория предполагает, что мы живем в лучшем из всех известных биологических времен (по крайней мере, с точки зрения биологического разнообразия), и есть все основания полагать, что впереди нас ждут еще лучшие времена — мир станет производительнее и разнообразнее даже без сумасшедших изобретений биоинженеров.

Хотя кажется, что работы Сепкоски убедительно показывают историю развития жизни как непрерывное движение ко все большему разнообразию, начиная с позднего мезозоя и до наших дней, тем не менее сомнения по поводу результатов исследований окаменелостей, описанных в более ранних работах, по-прежнему остаются. К тому же были проведены и другие серии экспериментов в отношении развития биоразнообразия. Больше всего обсуждался феномен под названием «ставка на последнее событие», согласно которому Сепкоски использовал методологию, не учитывающую разнообразие в глубоком прошлом, и показывал все так, будто видовое многообразие проявилось лишь в относительно недавние времена. Поскольку это действительно серьезные сомнения, ученые провели ряд исследований, чтобы проверить биоразнообразие в разные периоды. В самом начале XXI века проблема изучалась большой командой, которую возглавили Чарльз Маршалл из Гарварда и Джон Элрой, который тогда работал в Калифорнийском университете^[135]. Эта группа собрала еще большую, чем Сепкоски, базу данных, основой которой послужили коллекции различных музеев, тогда как метод Сепкоски основывался на подсчете числа видов, зафиксированных в научной литературе по определенным геологическим периодам. Большинство были поражены, когда оказалось, что уже первые результаты этого исследования кардинальным образом отличались от общепринятого мнения.

Анализ, проведенный группой Маршалла и Элроя, показал, что разнообразие видов в палеозое было почти таким же, что и в середине кайнозойской эры. Резкий скачок в разнообразии видов, который долгое время принимался за аксиому, в данном исследовании не прослеживался. Выводы просты: развитие разнообразия видов достигло своего пика сотни миллионов лет назад и с тех пор остается в усредненном спокойном состоянии. Возможно, скорость развития биоразнообразия достигла своего максимума на раннем этапе развития животных, и, в противовес всем точкам зрения со времен Филлипса, это развитие больше никогда не ускорялось, а может, даже замедлялось. Хотя, разумеется, многие эволюционные новшества, например, те, что позволили распространиться растениям и животным по суше, способствовали появлению многих новых видов, и это обогатило в целом биоразнообразие, но похоже, что с конца палеозоя количество видов на планете остается почти неизменным.

Итак, после первоначального взрыва в кембрии разнообразие видов животных возрастало по экспоненте и достигло равновесия в палеозойскую эру, затем резко упало в конце пермского периода, после которого последовал неизбежный возврат к росту разнообразия, но с непременным прерыванием этого процесса короткими интервалами снижения разнообразия — массовыми вымираниями, из которых пять были особенно

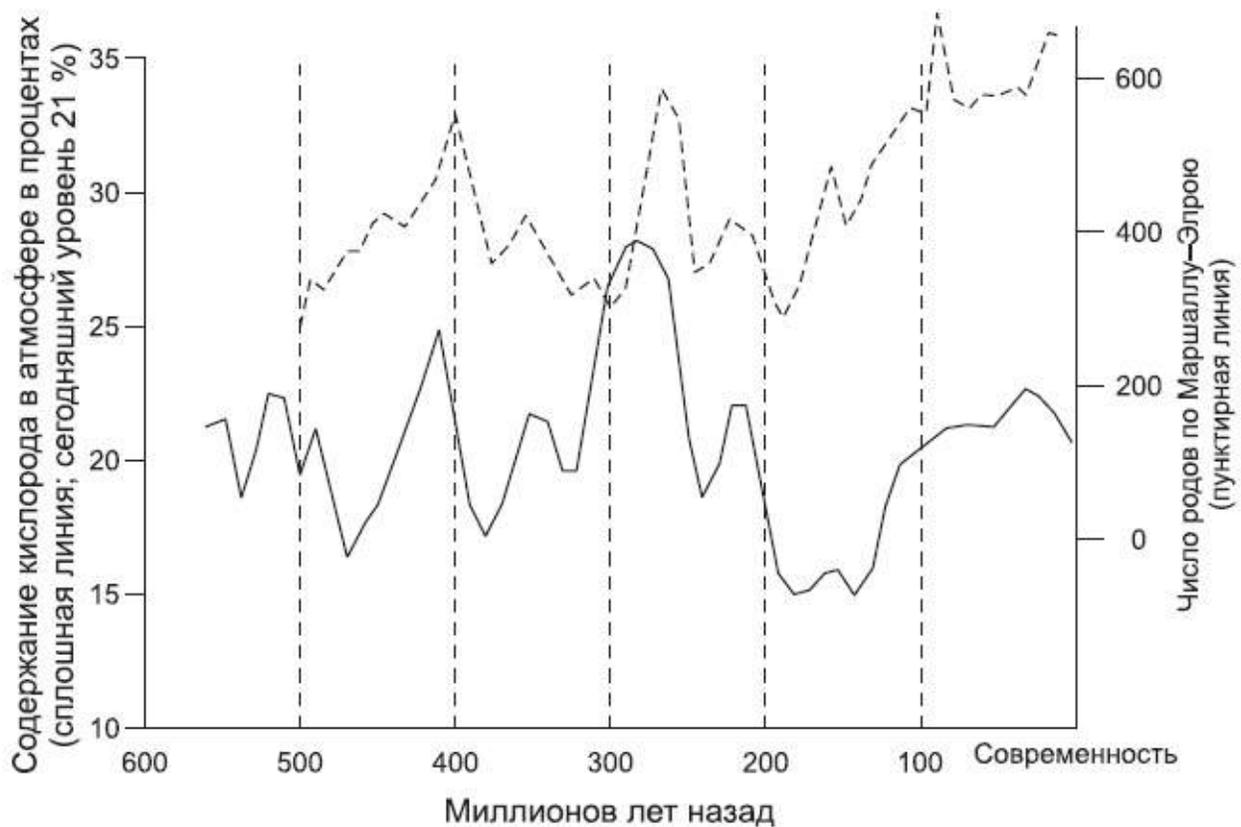
крупными. Хотя все периоды вымираний приводили к существенному обеднению групп организмов, за ними обязательно следовали периоды ускорения в формировании новых видов, и уровни разнообразия не просто восстанавливались, но количество видов в каждый последующий период превосходило уровень, предшествующий периоду вымирания.

Такая история развития жизни предполагает, что на наблюдаемую в фанерозое динамику разнообразия — и вымирания — влияет комплекс общих факторов. Среди многих факторов, которые позволяют объяснить возрастание разнообразия, можно назвать эволюционные нововведения, освоение до этого необитаемых и труднодоступных областей, появление новых ресурсов, а наиболее влиятельными факторами, объясняющими падение разнообразия видов, являются изменения климата, уменьшение обитаемых территорий и количества ресурсов, появление новых конкурентов в борьбе за выживание, в том числе хищников, а также внешние факторы, например, падение метеорита.



Динамика разнообразия морских беспозвоночных от начала кембрийского периода и далее, продемонстрированная Джеком Сепкоски. Его данные, основанные на долгой и кропотливой работе в библиотеках, показывают, что число родов в палеозое сначала быстро возросло, затем стабилизировалось, а в дальнейшем резко сократилось во время пермского массового вымирания. После Сепкоски отмечает большой скачок в численности родов животных, продолжающийся до наших дней.

Геохимикам давно известно, что уровни содержания в средах углекислого газа и кислорода показывают тенденции, имеющие обратное соотношение: когда увеличивается уровень кислорода, падает уровень углекислого газа. Иногда становится непонятно, как могло повлиять на развитие разнообразия животного мира изменение уровня углекислоты в концентрациях, не оказывающих никакого влияния или очень малое биологическое влияние на отдельный организм. Тогда вполне логично предположить, что дело в не уровнях углекислого газа, а в изменениях уровней кислорода, связанных к тому же с мировыми температурными режимами.



Здесь показаны уровни кислорода по работам Роберта Бернера, с учетом более новых, чем у Сепкоски, подсчетов числа родов животных, опубликованных Джоном Элроем и его соавторами. Примечательно очевидное соответствие между пиковыми показателями уровня кислорода (и высокими, и низкими) и линией, отмечающей динамику численности организмов (Питер Уорд. Из неопубликованных работ).

В холодной воде кислорода больше, чем в теплой. В холодном мире с высокой концентрацией кислорода в атмосфере жизни в океане также вряд ли будет угрожать малый уровень кислорода. С другой стороны, в теплом мире, где кислорода относительно мало, большая часть воды быстро станет застоявшейся. И не только пруды и озера, а целые океаны подвергнутся этому процессу в теплом мире, и таков мир с большим уровнем углекислого газа.

На сегодняшний день научные данные показывают, что (по крайней мере, для морских обитателей) в целом мировое таксономическое разнообразие животных соотносимо с уровнем кислорода, что не является неожиданностью, поскольку все животные не приспособлены к условиям с малым содержанием кислорода. А вот *по-настоящему неожиданным* оказалось то, что первоначальные уровни разнообразия организмов (измерения проводились в отношении видов и родов, которые объединены в группы по признаку общего предка) находились в обратном соотношении с уровнями кислорода. Высокие показатели возникновения новых видов, характерные для времени кембрийского взрыва (545–500 млн лет назад), приходятся на длительный период, когда уровень кислорода составлял 14–16 % (сегодня он составляет 21 %). Сильные скачки в содержании кислорода в силурийский период, а затем еще раз — в каменноугольный период соответствуют самому *низкому* показателю возникновения новых форм. Падение уровня кислорода в пермский период соотносится с возникновением новых организмов, но при этом — с падением общего количества видов. Кажется, это вполне ясный сигнал.

Времена, отмеченные высоким уровнем кислорода, напоминают экономический бум.

Низкий уровень безработицы, бизнес процветает и разрастается, но при этом случаи открытия нового дела не так часты. Открытие нового бизнеса, как кажется, характерно скорее для периодов упадка. В отчаянные времена возникают отчаянные идеи, и люди легче идут на риск. Но если и появляется много новых предприятий, то лишь немногие становятся успешными, к тому же в плохие периоды предприятия, процветавшие в период подъема экономики, начинают прогорать еще быстрее.

Такая вот двусторонняя система: появляется больше предприятий, но большинство из них быстро банкротится и исчезает, а вместе с ними и многие, до этого процветавшие. Также происходит ослабление циркуляции денежных потоков. Общее число предприятий сильно уменьшается.

По-видимому, нечто подобное наблюдается и в развитии видов. Высокий уровень кислорода означает хороший период для развития: большое количество видов, но совсем немного новых. Но когда уровень кислорода падает, виды исчезают быстрее, чем заменяются новыми, хотя реальное число возникающих видов выше, чем в периоды с большими концентрациями кислорода.

Примеров этому не счесть. Вот один из самых ярких: долговременный период увеличения уровня кислорода, начавшийся в юрском периоде и продолжающийся по сей день, сопровождается и долговременным падением в развитии новых видов, и при этом — большим разнообразием форм. Но что принципиально нового появилось? Птицы, млекопитающие, рептилии, амфибии — все они являются кайнозойскими незначительными модификациями морфологических типов, появившихся в палеозое и мезозое («плохие времена» — низкий уровень кислорода). Прекрасный пример принципиальных эволюционных новшеств, возникших непосредственно во времена с низким уровнем кислорода, — динозавры, а в кайнозое динозавров нет.

Гипотеза, что снижение уровня кислорода вкупе с одновременным увеличением содержания углекислого газа в средах стимулировало формирование новых видов в прошлом, при этом заметно увеличив скорость вымирания, имеет серьезное биологическое обоснование. Совокупным эффектом этих процессов стало уменьшение количества видов в периоды с низким уровнем кислорода. Падение уровня кислорода с сопутствующим повышением температуры становилось худшим для организмов двойным ударом, поскольку адаптация к более жарким условиям с низким содержанием кислорода в среде обитания никогда не бывает быстрым процессом. Больше шерсти, больше перьев, больше жира на теле — все это может по-быстрому решить проблему похолодания. Но сохранять комфортную температуру тела в жару намного труднее и требует более заметных эволюционных изменений. Это утверждение еще более справедливо для ситуаций, когда животные пытаются приспособиться к условиям малого количества кислорода, поскольку такая адаптация предполагает глубокие изменения на уровне многих систем организма, начиная с состава крови, лучшей ее циркуляции, а также усовершенствованных легких или жабр.

Самый поразительный аспект процессов, связанных с кислородом и его отношением к биоразнообразию, продемонстрировал в 2009 году Боб Вернер из Йельского университета. Он обратил внимание на примечательное сходство между кривой, показывающей изменение уровней кислорода в палеозое, и кривой развития разнообразия видов, которую построили Элрой и его группа. Мы приводили эти две кривые ранее. Существует небольшое прямое соотношение между уровнями кислорода и биоразнообразием в отрезках графиков, где обе кривые имеют резкие снижения с интервалами в десять миллионов лет. Но самое удивительное, что существует соотношение между изменениями уровня атмосферного кислорода и изменениями уровня разнообразия в пределах тех самых интервалов в десять

миллионов лет. Например, чрезвычайно значима и далеко не случайна корреляция между изменением процента содержания кислорода в атмосфере в период 230–220 млн лет назад и генетическим разнообразием в тот же самый период. С позиций статистики эти результаты весьма показательны.

Итак, наиболее интересным аспектом всех этих показателей является то, что с тех пор, как оба графика были представлены к обсуждению, результаты работы Вернера и его группы (да и других исследователей тоже), в которых оцениваются уровни кислорода и углекислого газа, представляются весьма неоднозначными. Так же, собственно, как и многочисленные кривые Элроя. Каждая группа исследователей выдала результаты (с одной стороны, касательно кислорода и углекислоты, с другой — численности родов живых организмов), которые получались из теоретических моделей с *совершенно различными исходными данными*. Ни один из множества показателей модели GEOCARB (круговорота углерода) или модели GEOCARBSULF (круговорота углерода-серы) не имеет никакого отношения к тому, сколько видов существовало в определенный период. И модель Элроя также совершенно не зависима от показателей уровней кислорода и углекислого газа. И тем не менее мы видим почти невероятное соотношение, возможно, случайное, но вряд ли — нет там никаких случайностей. По-видимому, уровни углекислого газа и кислорода (особенно кислорода) являются самыми важными факторами развития биологического разнообразия. Две независимые кривые на графиках в совокупности обеспечивают обсуждаемым здесь научным результатам самое главное требование к научному исследованию — наличие достоверности.

Совершенно очевидно, что освоение организмами сухопутных пространств открыло дорогу для бурного развития как видового разнообразия, так и морфологической диспропорции. В нашем понимании ситуация в отношении биоразнообразия такова: сегодня на Земле существует больше форм жизни — больше видов и больше путей развития новых видов, чем в прошлые периоды. Так ли это? Не вкралась ли ошибка?

Каждая уважающая себя научная теория имеет нулевую гипотезу, поэтому установим: морские животные на Земле достигли современного уровня разнообразия и численности в конце кембрийского периода. Такова была позиция Стивена Гулда в 1970-х годах, и его взгляды на сей предмет послужили мощным толчком к развитию серьезных научных направлений.

Ответ на вопрос, как развивалось разнообразие видов — резко и быстро или медленно и постепенно — вплоть до наших дней, связан с тем, насколько способны современные организмы сохраняться в виде ископаемых по сравнению с кембрием. Сегодня примерно одно из трех морских животных имеет твердые части, которые могут дать окаменелости, например, раковины, кости, панцири. А если в кембрийском периоде это соотношение было один к десяти? В таком случае, возможно, в кембрийских океанах обитало приблизительно столько же животных по численности, сколько и сегодня. Эта мысль подкрепляется работами Маршалла и Элроя, появившимися уже после Сепкоски. В их данных, демонстрирующих возрастание разнообразия в период после кембрия, не отмечаются тенденции ускорения в развитии видов, которые усматривал Сепкоски^[136] во времена, следующие за пермским периодом. Работа Элроя в дальнейшем несколько раз дополнялась новыми данными^[137].

Существуют и другие сведения об ошибочных и сомнительных гипотезах в моделях динамики биоразнообразия. Например, что делать с неравными объемами собранных образцов? Критики теорий развития биоразнообразия, какой бы теория ни была, указывают на то, что образцы пород кайнозоя или плейстоцена куда более многочисленны, чем образцы кембрийского периода. Более того, гораздо больше палеонтологов изучают кайнозой и плейстоцен, чем кембрий. Этот аспект исследований получил заметное освещение в независимых друг от друга работах Эндрю Смита из Британского музея^[138], Майка Бентона из Университета Бристоля^[139] и Шанана Питерса из Университета Висконсина^[140].

Оказалось, что существует весьма простое доказательство того, что со времен кембрийского взрыва наблюдается увеличение числа групп морских животных, независимо от того, говорим мы о видах, родах или семействах, и в основе его — изучение ископаемых следов жизнедеятельности с учетом времени. Следы жизнедеятельности являются результатом активности организмов, и мы продемонстрировали в главе, посвященной кембрийскому взрыву, что каждый отпечаток следа, найденный в породе, если он хоть немного отличается от прочих, неизменно относится к другому типу строения тела. Образцы следов жизнедеятельности отражают ту же картину разнообразия, что и окаменелости. Сегодня общепринятой является теория, что давно зафиксированная палеонтологами на примере беспозвоночных картина разнообразия организмов действительно дает нам вполне правдивые сведения о развитии биоразнообразия.

Большинство морских сред обитания, от шельфа до глубин, было освоено к концу девонского периода. Но этому морскому разнообразию предстояло вскоре уступить первенство по числу и формам намного более обширному сообществу живых существ на планете — животным и растениям суши.

Ордовикское массовое вымирание

Ордовик был периодом, в котором произошло первое из пяти крупных массовых вымираний. Все пять коснулись и растений, и животных. Разумеется, вымирания происходили и до ордовика, например, во время кислородной катастрофы или в периоды «Земли-снежка». Но в ордовикском периоде животные находились на подъеме развития разнообразия видов, как вдруг нечто резко прервало этот процесс. Самым простым объяснением может быть то, что это событие произошло, когда Земля находилась в «малом ледниковом периоде», что привело к массовой гибели кораллов из-за внезапного падения температуры. Однако причины этого события по-прежнему остаются загадкой, поскольку вымирание имело два отдельных этапа: в начале и в конце последнего временного интервала ордовикского периода, названного хирнантским оледенением.

Существуют и другие, более фантастические предположения о причинах ордовикского массового вымирания. Самое интересное заключается в том, что в ордовике Земля подверглась мощному потоку космического излучения, называемого гамма-излучением^[141]. Это самая драматическая из всех возможных причин, но нет ни малейшего доказательства, чтобы подтвердить подобную гипотезу, сколько бы об этом ни писали журналисты. До 2011 года причиной этого массового вымирания принято было считать отсутствие причин^[142]. Большинство пояснений сводилось к некоему быстрому похолоданию. В рамках одной из распространенных теорий предполагалось, что, возможно, в результате вулканической деятельности атмосфера наполнилась выбросами, содержащими серу^[143], как это случилось при извержении Кракатау в XIX веке, когда Европа провела «год без лета». Впрочем, недавно геологи и геохимики Калифорнийского технологического института^[144] пересмотрели теорию позднего ордовикского оледенения, используя данные, полученные на основе хорошо сохранившихся пород на острове Антикости в отдаленной области Канады, в заливе Святого Лаврентия, который когда-то располагался в тропиках. Применяв новый тип геохимического термометра, они с очень высокой точностью сумели измерить и относительный объем льда, и температуру. И вдруг выяснилось, что, хотя объем льда менялся очень медленно на протяжении хирнантского века, а тропическая температура оставалась очень высокой, но вполне предсказуемой — 32–37 °С, тем не менее в начале и в конце указанного временного интервала произошли резкие изменения обоих показателей. Напомним, что начало и конец хирнантского века связаны с двумя этапами ордовикского массового вымирания. Тропическая температура упала примерно до 5–10 °С, объем же льда в мире достиг или даже превысил максимум последнего оледенения в плейстоцене, а изотопы углерода продемонстрировали положительный скачок, что указывает на сильное возмущение мирового круговорота углерода — вероятно, в этом случае увеличилось накопление органического углерода.

Новые данные сужают круг предположений о реальных механизмах вымирания до двух возможных объяснений: либо это быстрое изменение климата, либо быстрое изменение уровня Мирового океана. В следующей своей статье участники той же исследовательской группы^[145] приводили результаты изучения двух огромных баз данных по Северной Америке: одна база показывала распределение окаменелостей, а другая — объем пород, в которых можно найти окаменелости (очень полезное дополнение к открытиям в области ископаемых!). Оба направления работ помогли объяснить вымирания: потеря среды обитания из-за понижения уровня моря и падение температуры оказались основными факторами. Однако неясно, являются ли эти пояснения исчерпывающими. Хронологические показатели

климатических изменений, включая скачки уровня углерода, удивительно схожи с некоторыми событиями, связанными с истинным перемещением полюсов, описанным ранее. Краткое истинное перемещение полюсов могло вызвать краткий период глобального похолодания и, возможно, оледенения. Это остается проблемой, которая все еще ждет своего решения, и наверняка оно окажется нетривиальным, но мы и назвали нашу книгу *новой историей*.

Глава 10

Род ископаемых рыб тиктаалик и покорение суши: 475–300 миллионов лет назад

Долгое время споры между сторонниками эволюционной теории и креационистами по вопросу о происхождении видов вращались вокруг предполагаемой несхожести первых амфибий и их непосредственных предшественников — ископаемых рыб, поскольку последние были очень уже «рыбообразными», а первые амфибии были чересчур «нерыбы», и это вполне удовлетворяло сомневающимся в эволюционной теории. Действительно, кое в чем креационисты были правы: до недавнего времени самый древний образец существа, которое признали земноводным^[146] (организм девонского периода, названный ихтиостегой, что означает «рыбоамфибия»), имел рыбообразное тело (в том числе вполне нормальный рыбий хвост) и четыре лапы. Его непосредственный предок представлялся существом с подобным телом, но без лап. Эта рыба, которую палеонтологи предлагали считать истинным предком ихтиостеги и других ранних сухопутных (или хотя бы часть своей жизни проводящих на суше) позвоночных, относится к группе лопастеперых, у них есть предшественники лап^[147] — плавники, которые находятся на широком мясистом основании.

Живое ископаемое латимерия (рыба целакант) считается, по крайней мере, похожей на непосредственного предка первых земноводных, включая ихтиостег. Критики эволюционистов спрашивали: «Где недостающие звенья?» Все представления по данному вопросу изменило открытие нового ископаемого в Арктике, в слое девонского периода. Ископаемое получило название «тиктаалик». Оно настолько соответствует представлениям о переходном звене, что нашедшие его дали ему прозвище «рыбоногое»^[148]. Это открытие является одним из важнейших не только потому, что помогает заполнить огромную пустоту в общей картине нашего понимания истории происхождения жизни (и дыру в цепи перехода от рыб к наземным позвоночным), но и позволяет укрепить позиции теории эволюции в целом.

Упомянутая огромная окаменелость служит великолепным лекарством от креационизма. Она была обнаружена в канадской Арктике международной группой исследователей, возглавляемой Нилом Шубином из Чикагского университета, и когда ее кости наконец с большим трудом извлекли из похожего на саркофаг участка осадочной породы, то сперва приняли за рыбу, так как сохранились следы чешуи и жабр, а также плоская голова и плавники с тонкими лучевыми костями, то есть обычные рыбы плавники. Однако у этой новой рыбы был крепкий внутренний костяк, необходимый животным подобного размера (в данном случае около 90 см), чтобы ползать по мелководью, используя плавники как опоры — подобно образу передвижения четвероногих животных. Тиктаалик обладает совокупностью черт, демонстрирующих великолепное пошаговое движение эволюции: от рыбы к четвероногостроению тела^[149].

Первое появление позвоночных на суше — замечательное событие в последовательном освоении суши водными существами и растениями, тем не менее позвоночные самыми последними выбрались из воды и присоединились к освоению сухопутных территорий. А если по порядку, то начать следует с растений.

Распространение растений на суше

Все исследователи солидарны в том, что величайшим этапом всей истории развития жизни на планете, если не считать само зарождение жизни, было появление фотосинтеза — процесса, в результате которого выделяется кислород. Именно данное явление позволило жизни двинуться из темных и влажных мест к освоению мелководных областей моря и пресных водоемов, используя при этом самый большой источник энергии, который может предложить наша планетарная система — Солнце. И вот благодаря кислороду, этому всего лишь побочному продукту реакции фотосинтеза, на нашей планете кардинальным образом изменился состав атмосферы, что привело к неожиданным неприятным последствиям для самих растений — появлению травоядных животных. Впрочем, как ни значительны были последствия возникновения фотосинтеза, еще более судьбоносным для всей планеты стал переход растений на сушу. Если исходить из геологических представлений, то скорость, с которой произошло освоение растениями суши, была просто бешеной: за период меньший, чем 1 % от всего времени существования жизни на Земле, сухопутные растения полностью изменили правила игры и всю историю развития жизни.

Ранее мы уже отмечали, что есть множество доказательств существования на суше примитивных форм, способных к фотосинтезу, еще за сотни миллионов лет до появления первых сухопутных животных. Наличие таких форм могло даже послужить основной причиной последнего периода «Земли-снежка» 700–600 млн лет назад. Мы не имеем ни малейшего представления о том, что это были за организмы: возможно, просто синезеленые водоросли, или же действительно формы, хорошо приспособленные к обитанию на суше, например, обладающие способностями сохранять постоянное местоположение, добывать питательные вещества, размножаться, получать из окружающей среды и затем сохранять для себя воду. Подобными организмами вполне могут оказаться существующие сегодня одноклеточные зеленые водоросли.

Однако даже эти растения возрастом 700 млн лет могут быть не первыми, кто выбрался из моря на сушу. Все больше палеобиологов приходят к заключению, что сухопутная жизнь намного старше — первыми были одноклеточные фотосинтезирующие бактерии, совершившие переход из моря на сушу по крайней мере 2,6 млрд лет назад. Если это так, то они являются настоящими пионерами суши, тогда как более развитые растения и животные стали сухопутными гораздо позднее.

Вот что нам известно: менее чем через 100 млн лет после появления морских животных некоторые виды зеленых водорослей, вероятно все еще обитающие в пресных водоемах, отказались от жизни в воде и перебрались на сушу. Здесь они быстро эволюционировали от простых, похожих на прутья, растений без листьев, наподобие многих современных мхов, до настоящих гигантов благодаря очередному нововведению эволюции — листьям.

Период 475–425 млн лет назад следует рассматривать как время необходимых, но медленных и постепенных изменений в природе растений, причем следов этих изменений почти не осталось. В начале этого периода у водных зеленых водорослей начали происходить значительные эволюционные изменения, которые позволили им получать пищу и воспроизводиться в среде, где соединялись воздух и почва, а не исключительно в водном пространстве. Конец этого периода отмечен ископаемыми, в которых отчетливо прослеживаются прекрасно сохранившиеся останки первых настоящих растений, обладающих сосудистой системой, корнем и стеблем. Переход этих первых безлистных растений к формам с листьями занял еще 40 млн лет. Но как только листья возникли,

произошла настоящая революция: к периоду 370–360 млн лет назад уже появились деревья высотой до 7,5 м.

Многоклеточным растениям понадобилось почти сто миллионов лет, чтобы разрастись из маленьких морских форм в обширные леса, покрывшие весь мир в девонском периоде. В некотором отношении эти растения имели намного большее воздействие на развитие жизни на суше, чем микробы, обитавшие там уже очень давно, поскольку многоклеточные сухопутные растения полностью изменили почвы и форму ландшафта. Также изменилась и степень прозрачности атмосферы, поскольку с распространением растений по суше трансформировались бесконечные дюны из песка и пыли, составлявшие доминирующую часть ландшафта планеты: гранулы песка и частички пыли теперь удерживались корнями растений намного крепче, чем это могли сделать наземные бактерии, ведь последние, будучи одноклеточными, даже распространяясь тонким покрывалом, не имели большой силы. Примитивные растения погибали и начинали гнить, толще становился слой почвы, и изломанные линии скалистых земных видов, которые существовали испокон веков, начали постепенно смягчаться. Очистился воздух, и впервые очертания континентов и морей, больших озер и рек можно было видеть не только вблизи, но и с больших расстояний, в том числе из космоса.

К концу девона леса покрыли планету почти целиком, изменив русла рек. Кроме того, из-за воздействия растений на атмосферу уровень содержания атмосферного кислорода достиг показателей, превышающих сегодняшние (21 %), до 30–35 %. Это позволило рыбам, у которых были конечности, но не было легких, выползти на сушу и выживать в течение сотен тысяч лет, потребовавшихся для формирования полноценного, способного дышать кислородом легкого. Все эти достижения жизни и изменения, вызванные растениями, стали возможны благодаря единственному морфологическому новшеству эволюции — наличию листьев.

Завоевание суши животными похоже на плохо подготовленную высадку десанта: несколько боевых групп появляются на берегу, при этом действуют нескоординированно, не последовательно, бойцы плохо вооружены и не приспособлены к бою в данных условиях, поэтому многие погибают. Стандартное объяснение данного этапа истории развития жизни следующее: поэтапные попытки животных выйти на сушу стали возможны благодаря развитию у животных соответствующих качеств, основными движущими факторами для этого послужили наличие неосвоенных ресурсов, невысокая конкуренция и малое — до некоторого времени — количество хищников. Другими словами, следующий эволюционный шаг членистоногих, моллюсков, кольчатых червей, а затем и позвоночных — крупнейшего типа, развившегося в процессе освоения суши, — произошел случайно и только потому, что животные достигли *уровня развития, позволившего* им вылезти из воды. Однако мы считаем, что животные сделали первый шаг на сушу, как только *уровень атмосферного кислорода позволил* им это.

Давайте же рассмотрим условия, благоприятствовавшие освоению растениями и животными сухопутных сред обитания, и потребовавшиеся для этого эволюционные приспособления. Начнем с растений, поскольку без наличия источника пищи на суше никакое животное не станет даже пытаться.

Уже около 600 млн лет назад эволюция растений привела к существованию большого разнообразия многоклеточных растений, некоторые известны нам и сегодня: зеленые, бурые и красные водоросли — обычные обитатели любого побережья на планете^[150]. Но это были растения, обитавшие в морской воде, где необходимые для жизни компоненты — углекислый газ и пищевые элементы — были легкодоступны, и размножение в жидкой среде происходило легко. Выход на сушу требовал серьезных эволюционных изменений для поглощения углекислого газа, пищи, развития средств поддержки тела в пространстве, в системе размножения. Каждый из этих аспектов предполагал значительные модификации в строении тела всего водного типа организмов.

Большинство этапов данного периода истории развития жизни вызывает жаркие дискуссии, особенно на предмет того, насколько многочисленны и разнообразны были группы организмов в протерозойском эоне, даже перед периодом «Земли-снежка» в протерозое^[151]. Хотя, конечно, пресса любит слова типа «древнейший», «крупнейший» и прочее в превосходной степени, следует признать, что есть некоторый дисбаланс между скоростью открытия и классифицирования новых наземных растений и необходимостью их более точной датировки. Например, в 2010 году вызвало ажиотаж сообщение об открытии очередного «древнейшего» сухопутного растения в ископаемых отложениях в Аргентине, а на деле оказалось, что это растение относится к обычным печеночным мхам, датированным 472 млн лет^[152]. Однако ошибка в датировке таких древних пород чревата серьезными последствиями. Кроме того, хотя это действительно очень древние «сосудистые» растения, имеющие сложные внутренние системы передвижения веществ, дело осложняет проблема определения того, что считать растением. Задолго до периода, датируемого 472 млн лет назад, присутствовало множество видов фотосинтезирующих организмов с разнообразными строениями тела, которые мы можем называть растениями. Многие палеобиологи предполагают, что большое разнообразие грибов, а также зеленых фотосинтезирующих микробов и многоклеточных растений могло существовать на суше раньше, чем принято думать, и даже миллиард лет назад, возможно, процветали необычайно многочисленные

сообщества форм, которые в совокупности можно называть растениями, если отнести к этой категории лишайники, грибы, а также зеленые микробы, тонким покровом устилавшие болота и влажные участки земли^[153].

Фотосинтезирующие многоклеточные растения, в принадлежности которых именно к растениям никто не сомневается, произошли в конечном итоге от зеленых водорослей (харовые водоросли, *Charophyceae*). На этом пути было немало препятствий, и первым из них, вероятно, являлся слишком сухой климат. Зеленые водоросли, попадая из подводной среды обитания на воздух, очень быстро обезвоживаются и погибают ввиду отсутствия защитных покровов, однако порождают способные к воспроизведению зиготы, покрытые надежной мембраной-кутикулой, которая может служить на воздухе защитным покровом для всего растения. Впрочем, в процессе эволюции этой кутикулы возникла другая проблема: оберегая наполненные жидкостью клетки, она отсекала доступ углекислого газа. В океане углерод находится в виде растворенного в воде углекислого газа и поглощается просто сквозь стенки клетки. На суше, чтобы обеспечить доступ углекислого газа внутрь, в эволюционирующих наземных растениях образовались отверстия, называемые устьицами — это своеобразные порталы для доступа в организм газообразной углекислоты из воздуха.

Растение также должно было как-то прикрепляться к месту, и, вероятно, это происходило путем симбиоза с грибами, который также обеспечивал способ добывания воды из почвы.

Переход на сушу также требовал физического поддержания тела организма в пространстве. К тому же растения нуждались в больших пространствах, хорошо освещенных солнцем. Один из способов решения обеих проблем заключался в том, что растение может просто лежать на земле, и скорее всего первые растения такими и были — лежачими. Сегодня подобным образом ведут себя мхи, ковром покрывающие землю. Ордовикский мир являлся, вероятнее всего, миром мхов, в котором самое высокое «дерево» было не более 6–7 мм. Однако подобное положение дел не являлось решением проблемы: преимущество в росте позволяет получить намного больше света, особенно в экосистеме, где существует большая конкуренция среди многочисленных низкорослых растений. И вот у ранних растений развились первые твердые компоненты, появились стебли, а затем и древесные стволы. Сопутствующим эволюционным процессом развития транспортной системы растений стало появление корней и листьев. В конце концов возникли и репродуктивные части, которые могли противостоять засушливым периодам и обеспечивать воспроизводство в наземных условиях.

Таким образом, переход растений из воды на сушу состоялся, а вместе с образованием первых больших запасов углерода в земле стало возможно и быстрое появление на суше животных. Новые ресурсы стимулировали новые направления эволюции. Если первые сухопутные растения эволюционировали из небольшой группы пресноводных зеленых водорослей, как это принято предполагать, они оставили об этом переходном этапе очень мало свидетельств весьма фрагментарного характера. Раскопки (и в прямом, и в переносном смысле) в это области следует проводить тщательно и аккуратно.

Серьезные исследования окаменелостей первых многоклеточных растений начинаются с одной новаторской работы 1937 года. Мы же используем как фундамент для обсуждения вопросов палеоботаники в нашем сочинении работу, предложенную нашим блестящим, хотя и довольно едким в высказываниях коллегой из Университета Шеффилда Дэвидом Бирлингом. В своей замечательной книге *The Emerald Planet* («Изумрудная планета») он совершенно обоснованно жалуется на то, что его область исследований — палеоботаника — приходится науке нелюбимой падчерицей. Он прав, поскольку динозаврам посвящена

львиная (динозавровая?) доля научных работ, тогда как растения остаются до сих пор мало обсуждаемым предметом, а между тем именно они являются ключевыми организмами на Земле в вопросах влияния на историю развития жизни. Книга, посвященная изменениям нашей планеты с течением истории развития жизни, должна на самом деле содержать одну главу о животных и все остальные — о растениях. Наше описание той роли, которую сыграли растения в развитии жизни на планете, полностью основывается на работах Дэвида Бирлинга, особенно на его книге.

И все же истоки палеоботаники — в работах Вильяма Ландера, в которых описано, как растения завоевали сухопутные экосистемы и изменили природу жизни на Земле, повлияв на мировой температурный режим, химический состав океанов и атмосферы. Именно Ландер впервые показал эту роль растений, а также обнаружил самое древнее (на тот момент) сухопутное ископаемое растение в породах возрастом 417 млн лет в Уэльсе. Однако оно недолго оставалось самым древним, поскольку вскоре в том же Уэльсе были обнаружены ископаемые растения и в более древних породах, возраст которых позднее был датирован 425 млн лет.

То первое «древнейшее» растение получило название «куксония». Со времен своего первого появления сухопутные растения прошли долгий и удивительный путь эволюции, а в период 424–360 млн лет назад испытали даже нечто наподобие кембрийского взрыва у животных. Развитие растений было не только долгим, но и по большей части медленным. Согласно новым данным, в течение по меньшей мере 30 млн лет со времени своего возникновения растения не имели листьев. Представляется, что растения с листьями появились не раньше чем 360 млн лет назад.

До сих пор непонятно, почему эволюция листьев заняла так много времени. Даже после того как листья наконец появились, прошло еще 10 млн лет, пока они не стали широко распространенными — разнообразными и многочисленными — на всей планете. Необычайно медленное развитие сухопутных растений, от первого появления до широкого распространения растений с листьями, особенно хорошо заметно по сравнению с такой же необычной по своей быстроте эволюцией млекопитающих. После вымирания динозавров 65 млн лет назад млекопитающим потребовалось менее 10 млн лет, чтобы распространиться по Земле в больших количествах, демонстрируя огромное разнообразие размеров и типов.

Обратимся снова к теории «эво-дево» и генетике для описания этого непонятного этапа эволюции растений. Чтобы появились листья, необходимо было сперва обзавестись генетическим инструментом для их развития, а потом требовалось еще некоторое время, чтобы этот инструмент можно было использовать. На сегодняшний день мы располагаем данными, что у древних растений были гены, позволявшие создавать листья, но окружающая среда оказалась неподходящей для подобного эволюционного действия. В данном случае речь не об уровне кислорода, как в случае животных, — растения ждали уменьшения количества углекислого газа в атмосфере, так, по крайней мере, говорится в самых последних исследованиях XXI века по палеоботанике.

Данная ситуация — еще один пример того, как события древнейшей истории развития жизни объясняются с помощью наблюдений над современными организмами: в ходе экспериментов с современными растениями была установлена их чрезвычайная чувствительность к уровню углекислоты в среде обитания. Все растения нуждаются в углекислом газе для фотосинтеза, при этом растение поглощает углекислый газ из окружающей атмосферы. Если есть листья, то углекислый газ проникает через отверстия-устьица, но происходит еще один — обратный — процесс: выделение воды через те же устьица. В ходе эволюции постоянно присутствует один момент, общий для сухопутных

растений и животных: и те и другие очень живо реагируют на недостаток воды, что является одним из самых серьезных препятствий развитию жизни. В условиях с высоким содержанием углекислого газа в организмах образуется очень мало устьиц, но как только содержание углекислоты снижается, число устьиц увеличивается.

Можно подумать, что большое количество углекислого газа было бы оптимальным условием для жизни сухопутных растений, и с точки зрения физиологии это так. Однако известно, что углекислый газ — один из основных парниковых газов. Времена высокого содержания углекислого газа в атмосфере — это времена очень высоких температур на Земле.

У растений есть тонко настроенная система ощущений, которая позволяет полностью сформированным зрелым листьям посылать сигналы еще только начавшим формироваться, в том числе информацию об оптимальном количестве устьиц для той среды обитания, в которой они находятся. Если мы оценим объемы углекислого газа в атмосфере периода появления первых сухопутных растений (около 400 млн лет назад), то обнаружим крайне высокий уровень углекислоты и соответственно планету с крайне жарким климатом. Именно эта жара, вероятно, и стала главной причиной приостановки эволюции растений. Устьица пропускали в растения углекислый газ, но через них же уходила из растений вода — этот процесс остужает организм.

Незначительная потеря воды охлаждает растение, но большая потеря ведет к его гибели. Успешное существование возможно, если уметь соблюдать баланс. В очень жарком климате необходимо серьезное охлаждение. Но если в атмосфере очень много CO_2 , растению требуется совсем немного устьиц для удовлетворения своих потребностей. С другой стороны, то же количество устьиц, необходимых для проведения углекислого газа внутрь растения, может оказаться слишком малым для охлаждения, особенно если устьица располагаются на большой, плоской поверхности, например, листе. В таком случае наличие больших листьев с малым количеством устьиц может привести к сильному перегреву и гибели растения. Таково новое объяснение долговременности эволюции листьев. Растения располагали необходимым для формирования листьев инструментом, но в атмосфере содержалось так много углекислого газа, что растения просто не осмелились этим инструментом воспользоваться.

Новые исследования Дэвида Бирлинга и других ученых показали, что потребовалось значительное падение уровня углекислого газа в атмосфере, чтобы стала возможной эволюция листьев. До этого времени появление любого листа означало для растения смертный приговор. Таким образом, только через 40 млн лет после появления куксонии возникли растения с листьями, а также с более развитой транспортной системой, включающей корни. Способность пускать корни подальше и глубже дала растениям два дополнительных преимущества. Во-первых, при наличии глубоких корней растение более устойчиво и лучше закреплено в почве. Во-вторых, глубокие корни позволяют эффективнее использовать почвенные запасы воды и питательных веществ. Первые растения имели слабые, исключительно поверхностные корневые системы, но как только появились листья, корни также стали меняться и развиваться, проникая все дальше вглубь.

Мы располагаем данными, что к началу девонского периода растения уже обладали корневыми системами, уходившими в землю на глубину до одного метра. Более глубокие корневые системы заметно усилили физическое и химическое выветривание пород, на которых располагались растения. Чем больше растений появлялось и чем больше их погибало, тем больше органического материала добавлялось в почву. Все это имело большое значение для атмосферы и температурных режимов на Земле.

Возможно, самым важным фактором снижения количества углекислого газа в атмосфере

было выветривание кремниевых пород, гранитов, а также осадочных и метаморфических пород с составом, близким к граниту, — с высоким содержанием кремния. Реакция химического выветривания кремнийсодержащих пород приводит к удалению из атмосферы углекислого газа. Это называется биотическим фактором выветривания, и начался данный процесс, как только на планете появились леса с высокими деревьями, — около 380–360 млн лет назад. Корни проникали все глубже в кремнийсодержащие породы, граниты и подобные им породы подвергались все более интенсивному по сравнению с периодом до возникновения лесов выветриванию, а это привело к быстрому снижению уровня углекислого газа в атмосфере.

Результатом снижения уровня углекислоты также стало появление льда на континентах, сначала только в высоких широтах, но потом и в более низких. Неумолимый ход эволюции предпочитал более высокие деревья, а вместе с большой высотой развивались и более глубокие корневые системы, климат на планете становился все более прохладным. Эволюция сухопутных растений в конце концов обернулась одним из самых длительных ледниковых периодов в земной истории, который начался в каменноугольный период. Но до этого мир был теплым и ласковым, в атмосфере присутствовало благоприятное для буйного развития растений содержание углекислого газа. Подводя краткий итог, скажем, что континенты, впервые зазеленевшие благодаря распространению сосудистых растений, напоминали огромный овощной магазин с широчайшим ассортиментом, вот только покупателей в нем пока не было. Бесплатная еда, только зайти! А в нашем случае — вылезай из воды на сушу и... оставайся.

Первые сухопутные животные

Основной проблемой для любого первого наземного животного являлась острая нехватка воды. Во всех живых клетках должна быть вода, и водный образ жизни эту потребность легко обеспечивал. Проживание на суше, однако, требует наличия плотного верхнего покрова, чтобы вода удерживалась внутри организма. Сложность в том, что решения, позволяющие снизить потерю воды на воздухе, противоречат потребностям кожного дыхания. Вот вам и задачка: с одной стороны, иметь внешний покров, который сохраняет воду, это преимущество, но в то же время присутствует риск умереть от удушья. Альтернативой может стать система дыхания, при которой кислород проникает через внешний покров, но возрастает риск потери влаги через ту же систему. Данную дилемму пришлось разрешить всем первооткрывателям суши. Очевидно, процесс был настолько трудным, что лишь совсем небольшому числу групп животных, растений и простейших удалось это сделать. Некоторые из многочисленных и самых распространенных современных морских обитателей, по-видимому, так и не смогли покорить сушу: не существует наземных губок, стрекающих, плеченогих, мшанок и иглокожих, да и многих других тоже.

Древнейшими окаменелостями сухопутных животных, вероятно, являются маленькие членистоногие, напоминающие современных пауков, скорпионов, клещей, равноногих раков и примитивных насекомых. Неясно, какая из перечисленных групп членистоногих была первой, впрочем, первенство не продлилось долго, поскольку в палеонтологической летописи обнаруживаются представители всех данных таксономических групп.

Классификацию этих первых сухопутных животных неизбежно пришлось проводить по окаменелостям, что не гарантировало точности, поскольку речь шла о маленьких наземных членистоногих, которые имеют очень слабо отвердевающие экзоскелеты и поэтому редко сохраняются в отложениях. К концу силурийского периода или к раннему девону, около 400 млн лет назад, тем не менее распространение на суше растений позволило выйти из воды и авангарду животного царства. Совершенно ясно, что независимо друг от друга членистоногие из разнообразных таксонов приобрели в процессе эволюции дыхательные системы, способные поддерживать жизнь на воздухе.

Дыхательная система современных пауков и скорпионов объясняет, как они превратились из процветающих морских обитателей в не менее процветающих сухопутных жителей. Для такого шага — из воды на сушу — никакая другая система организма не требует столь важных изменений, как дыхательная. Также представляется совершенно очевидным, что легкие первых сухопутных членистоногих были переходным звеном эволюции, почти таким же эффективным, как у более поздних видов. Но в атмосфере с большим количеством кислорода можно было дышать всем телом — воздух проникал по всей поверхности этих маленьких сухопутных существ (они точно были очень маленькими), и кислород свободно попадал в их примитивные легкие.

Из всех типов животных, перебравшихся на сушу первыми — сюда входят многие группы членистоногих, моллюски, кольчатые черви, хордовые (а с ними и очень маленькие существа вроде нематод), — членистоногие все же были самыми первыми, поскольку их тела уже имели плотное внешнее покрытие, обеспечивающее удержание воды в организме. Однако и перед ними по-прежнему стояла проблема дыхания. Уже упоминалось, что внешний скелет членистоногих потребовал эволюции больших жабр почти на всех сегментах тела, чтобы обеспечить выживание в кембрии (именно тогда появилось большинство высокоразвитых ископаемых членистоногих) при малом содержании кислорода в

окружающей среде. Но жабры не функционируют на воздухе. Первые сухопутные членистоногие — пауки и скорпионы — развили новый вид дыхательной системы под названием «легочная книжка» (внутреннее строение такого легкого напоминает книжные страницы).

Данная «книжка», «страницами» которой являются листки ткани, заполненные гемолимфой (жидкостью, играющей у членистоногих роль крови), вложена в легочный мешок (*атриум*), сообщающийся с внешней атмосферой через дыхательные отверстия в панцире. Это пассивное легкое, поскольку притока воздуха, вдыхаемого через такую структуру, не происходит, поэтому его работа зависит от определенного минимума кислорода.

Некоторые очень маленькие пауки, как известно, могут быть подняты ветром на большие высоты, поэтому их называли аэропланктоном. Данный факт доказывает, что легкие-книжки у пауков способны извлекать кислород и в среде с низким содержанием кислорода. Однако представители аэропланктона настолько малы, что их дыхательные потребности могут быть удовлетворены пассивным проникновением газа в тело. Более же крупные пауки из-за своих легких-книжек очень уязвимы.

Более эффективны по сравнению с дыхательной системой насекомых, состоящей из трахей, возможно, жабры-книжки. Система дыхания насекомых пассивна в том плане, что в ней отсутствует или крайне слаб механизм нагнетания воздуха, хотя последние исследования показывают, что некоторое нагнетание все же присутствует, но с очень слабым давлением. Система легкого-книжки у паукообразных имеет намного большую площадь поверхности, чем у насекомых, и поэтому может функционировать в условиях низкого содержания кислорода в среде.

Время первого этапа проникновения на сушу пауков и скорпионов очень сложно определить, так как древние пауки и скорпионы имели очень малые размеры и почти не оставили окаменелостей. Современные скорпионы имеют большую степень отвердевания, чем пауки, и поэтому чаще встречаются в осадочных отложениях.

Самые ранние свидетельства существования сухопутных животных относятся к позднему силуру (ископаемые в Уэльсе) — около 420 млн лет назад — это почти конец силурийского периода. В то время уровень кислорода достиг самых высоких показателей за всю историю существования Земли. Окаменелости того периода немногочисленны и демонстрируют слабое разнообразие. Впрочем, их распознали и классифицировали как многоножек.

Намного более богатую коллекцию ископаемых представляет знаменитый райниевый черт в Шотландии, датируемый 410 млн лет назад. Это отложение содержит окаменелости очень ранних растений, а также маленьких членистоногих, большинство которых относится, вероятно, к современным клещам и ногохвосткам — представители обеих групп питаются остатками растений и потому, скорее всего, были хорошо приспособлены к жизни в новых сухопутных условиях, где царили в основном маленькие и примитивные растения. Клещи роднятся с пауками. Ногохвостки, впрочем, насекомые и, вероятно, первые из этого самого многочисленного на сегодняшний день класса животных. Было бы вполне логично предположить, что насекомые сразу же развили такое огромное многообразие форм жизни на суше. Однако это не так, все произошло как раз наоборот.

Палеознтомологи обнаружили, что насекомые оставались немногочисленной группой сухопутной фауны вплоть до конца раннего каменноугольного периода, когда уровень кислорода достиг современных показателей — около 330 млн лет назад. Окаменелости насекомых становятся более многочисленными к позднему каменноугольному периоду —

около 310 млн лет назад. Летать насекомые начали гораздо позднее момента своего рождения — несомненные признаки летающих насекомых можно обнаружить в отложениях, датированных 330 млн лет назад. Вскоре после своего первого полета насекомые совершили невероятный эволюционный скачок, породив множество новых видов, в основном летающих. Это классический случай эволюционной радиации, когда быстрое (в геологических масштабах) и массивное возрастание таксономического разнообразия определенных групп организмов позволяет им занять новые экологические ниши. Однако подобная радиация произошла в период, когда в атмосфере наблюдался очень высокий уровень кислорода, и, бесспорно, именно такое состояние атмосферы и обеспечило успешность этих процессов.

Насекомые все же не были первыми животными на суше, первенство, видимо, принадлежит скорпионам. В середине силурийского периода, около 430 млн лет назад, из пресноводных болот и озер выползли первые протоскорпионы. У них были жабры, приспособленные к жизни в воде, и питались они, вероятно, останками мертвых животных, например, рыб, выброшенных волной на берег. Жабры оставались влажными, а их очень большая площадь поверхности обеспечивала какое-то дыхание. У них точно не было никаких легких, только жабры.

Порядок появления животных на суше можно представить следующим образом: скорпионы — около 430 млн лет назад, но они, скорее всего, были сильно привязаны к воде из-за размножения и, возможно, даже дыхания; многоножки — 420 млн лет назад; насекомые — 410 млн лет назад. Однако привычные нам насекомые появились не ранее чем 330 млн лет назад. Как такой порядок связан с изменениями уровня кислорода в атмосфере?

Новейшие способы определения уровня содержания кислорода в атмосфере позволяют определить, что максимальный уровень содержания кислорода в атмосфере приходится на период около 410 млн лет назад. Затем последовал резкий спад, после чего вновь начался подъем — от очень низких показателей (12 %) в конце девона до самых высоких за всю историю планеты в пермский период (более 30 %). Сегодня, напомним, содержание кислорода в атмосфере — 21 %. Райниевый черт, в котором впервые обнаружилось многочисленное скопление насекомых и паукообразных, относится к периоду кислородного максимума в девоне. Затем, согласно отчетам палеонтологов, изучающих вопросы разнообразия насекомых, последние встречаются в ископаемых редко. Такое положение сохраняется вплоть до скачка кислородного уровня до 20 % в интервале между ранним и поздним карбоном, 330–310 млн лет назад, в период распространения крылатых насекомых.

Распространение на суше позвоночных стало возможно благодаря, скорее всего, увеличению содержания кислорода в атмосфере в ордовикском и силурийском периодах. Если бы не это обстоятельство, возможно, и история развития животных на суше, и формы сухопутных животных были бы совершенно иными. А может, не было бы сухопутных животных вообще. Нам также известно, что сразу после выхода из воды, выживая в условиях с низким содержанием кислорода в атмосфере, животные были очень немногочисленны.

Возможны три объяснения распределению окаменелостей, наблюдаемому в породах тех периодов.

Первое: эта видимая пауза в развитии сухопутных животных на самом деле не существовала; просто очень плохая палеонтологическая летопись периода 400–370 млн лет назад.

Второе: пауза действительно была — кислорода было мало, и очень мало членистоногих обитало на суше, особенно насекомых. Но те немногие, которым удалось выжить, смогли породить огромное разнообразие форм, когда через 30 млн лет уровень кислорода повысился.

Третье: первые выходцы из водной среды обитания на сушу были сметены падением уровня кислорода. Правда, местами кое-кто выжил. А уже вторая волна покорителей суши была настоящим роем переселенцев, которые воспользовались увеличением уровня кислорода. Освоение суши животными (членистоногими и, как мы увидим, позвоночными) происходило двумя определенными этапами: 430–410 млн лет назад, а затем — 370 млн лет назад и позднее.

Членистоногие были не единственными, кто приспособивался к жизни на суше. Брюхоногие моллюски также совершили эволюционный бросок на сушу, но не ранее позднего карбона, то есть они являлись частью второго этапа освоения суши животными, когда уровень кислорода стал достаточно высок. Другая группа животных — мечехвосты — прибыла на сушу примерно в то же время, что и моллюски. Однако это все были малочисленные колонисты по сравнению с группой, которая интересует нас больше всего, — нашей, то есть позвоночными.

Но земноводные не просто так выпрыгнули из моря. Они были кульминацией очень долгого эволюционного пути, и прежде чем они появятся на суше и в нашем повествовании, представим себе девонский период, который давно уже называют эпохой рыб. Примером может служить наше любимое место — относящийся к девону бассейн Каннинг (*Canning Basin*) в Западной Австралии, где авторы этой книги провели множество полевых исследований. Бассейн Каннинг является одним из самых прекрасных (очень жарких!) мест в мире, где лучше всего сохранились окаменелости барьерного рифа — будто современный Большой барьерный риф вдруг превратился в камень, а вода неожиданно ушла. Хотя большая часть работ о бассейне Каннинг посвящена именно этому гигантскому рифу девонского периода, тем не менее породы, образовавшиеся в более глубоких морских местах того периода, содержат особенно впечатляющие ископаемые, которые, безусловно, заслуживают присутствия на страницах любой *новой* истории развития жизни на Земле.

Джон Лонг и рыбы формации Гого

Хотя окаменелости рыб встречаются и в отложениях, сформированных в морской воде, и в пресной воде, и во всех видах солоноватых водоемов, следует отметить, что вообще-то ископаемых образцов рыб в целом очень мало. Чтобы погибшая рыба быстро и целиком покрылась слоем осадочных материалов и таким образом сохранилась, требуются условия морского дна с малым содержанием кислорода в воде. К тому же падальщики очень быстро добираются до рыбы. И все же кое-что для палеонтологов осталось. Например, двумерные отпечатки в сланцах Грин-Ривер в Колорадо, относящиеся к эоцену. Пожалуй, это самое богатое окаменелостями рыб место в мире. Но иногда разные части тела рыб, особенно большие рыбы черепа, обнаруживаются в больших шарообразных агрегатах пород, называемых конкрециями. Эти объекты, похожие на пушечные ядра, часто можно найти в осадочных отложениях, они содержат прекрасно сохранившиеся окаменелости. Подобные ископаемые можно увидеть, например, в слоях девонского периода в Огайо, где на протяжении целого века находили гигантские рыбы черепа, включая знаменитый череп древнего чудовища — дунклеостея, который недавно демонстрировали на канале «Дискавери» в передаче о хищниках.

Похожие конкреции были обнаружены и в геологической формации с любопытным названием Гого (это наше собственное открытие), которая также относится к девонскому периоду, но только в более глубоководной области. Некоторые из этих конкреций содержат важнейшие из когда-либо найденных образцов. Они дают представление о том, из какой именно ниши пришли наши предки-амфибии. Чтобы воссоздать путь освоения суши, мы сперва должны представить себе девонский мир рыб во всем их многообразии и сложности. Австралийский палеонтолог Джон Лонг, профессор Университета Флиндерс (Аделаида, Австралия), а также давний сотрудник Музея естественной истории в Лос-Анджелесе, в последние годы применял новую технологию сканирования с высоким разрешением, пытаясь совершить прорыв в изучении предков всех современных рыб, а также проследить во времени генетическую общность, в том числе и с нашей собственной ДНК.

Лонг — выдающийся австралийский ученый и автор многих книг. Результаты его кропотливого труда доказывают, что эволюция, морфология, разнообразие и экология рыб девонского периода были намного сложнее, чем это представлено в учебниках. Впервые применив некоторые сканирующие методы, в том числе компьютерную томографию, что позволило ему создать трехмерные изображения ископаемых, Лонг в буквальном смысле заглянул в головы рыбам различных таксономических групп.

Итак, четыре *традиционно выделяемых* класса рыб — миноги, акулы, самые многочисленные «костные» рыбы, а также полностью вымершие панцирные — оказались во всех отношениях куда сложнее бытующего о них представления. Самые значительные открытия Лонга в его экспедициях к формации Гого включают первый полностью сохранившийся скелет одной из первых костных рыб — гогонасуса (*Gogonasus*), — у которой на верхней части головы обнаружили дыхательные отверстия, о существовании которых у рыб не было известно. Лонг также обнаружил ранее неизвестные разнообразные виды ранних рыб, включая новый тип двоякодышащих (очень близких к тем, что выползли на сушу), а также необычных рыб — артродир. Но самая потрясающая находка — девонские рыбы с эмбрионами внутри. Это первый случай, демонстрирующий древнейший пример воспроизводства путем внутреннего оплодотворения, а также первый пример живорождения у позвоночных. Один из образцов Лонга демонстрирует наличие окаменелой пуповины,

связанной с эмбрионом, — единственный известный пример такого рода. Лонг благодаря использованию новейших методов смог отобразить мышечную ткань, нервные клетки, капилляры, то есть строение ископаемых рыб во всех подробностях. Его открытия позволяют совершенно по-новому взглянуть на эволюцию — от первых шагов рыб на сушу до эволюции лап и ходячих животных, в том числе двуногих.

Развитие сухопутных позвоночных

Переход представителей нашего биологического подтипа от исключительно водных форм к настоящим сухопутным организмам начался с эволюции первых земноводных. Ископаемые дают хорошее представление и о видах, вовлеченных в данный процесс, и о времени его развития. Представляется, что предками амфибий являлись костные рыбы девонского периода, известные как рипидистии. Эти рыбы были хищниками и обитали, по-видимому, преимущественно в пресных водоемах. Последний факт интересен сам по себе, поскольку означает, что переход из моря на сушу имел промежуточный пресноводный этап. То же может оказаться верным и для членистоногих.

Благодаря развитым мясистым основаниям плавников рипидистии были хорошо подготовлены к выходу на сушу и передвижению по сухопутным поверхностям. Живое ископаемое латимерия как раз демонстрирует, каким могло быть то существо, от которого пошли земноводные. Для более глубокого понимания этапов перехода к сухопутному существованию стоит обратиться к другой группе рыб — двоякодышащим. У них тоже развиты основания плавников, но они интересны нам не с позиций развития способов передвижения, а как пример возможного перехода от жабр к легким. Даже самые лучшие в мире конечности будут бесполезны, если начинающие свой путь амфибии не смогут дышать. Поэтому отметим, что существуют две генеалогические линии рыб с развитыми основаниями плавников: кистеперые (к ним относится и латимерия) и двоякодышащие.

Отделение амфибий от их предков с плавниками произошло примерно 450 млн лет назад, или на границе между ордовиком и силуром. Но, возможно, в тот момент все еще продолжалась эволюция рыб, от которых произошли земноводные, самих земноводных тогда еще могло и не быть. Палеонтолог Роберт Кэрролл, специализирующийся на вопросах перехода организмов от рыб к амфибиям, считает подкласс рыб остеолепис (*Osteolepis*) наилучшим кандидатом на роль переходного организма между рыбами и амфибиями, а эта группа организмов появилась не ранее первой половины девонского периода, то есть приблизительно 400 млн лет назад.

Первые сухопутные земноводные, возможно, появились именно в этот период, если судить по отпечаткам лап, сохранившимся в Ирландии. Эти признаки следов жизнедеятельности принимают за древнейшие свидетельства существования животных, способных оставлять следы лап, и датируются они 400 млн лет. Никаких скелетов, которые могли быть связаны с этими следами, не найдено. Следы представляют собой около 150 отдельных отпечатков лап животного, которое ползло по древней болотной грязи, волоча за собой толстый хвост. Эта находка вызвала дискуссии, поскольку указанные следы относятся к значительно более раннему периоду, чем кости первых четвероногих животных, в подлинности которых не сомневаются. Примечательно, что эти следы оставлены во времена, когда уровень атмосферного кислорода равнялся или даже превышал современный, то есть в период появления первых сухопутных членистоногих — насекомых и паукообразных. Вполне возможно, что изменение уровня кислорода повлияло не только на членистоногих, но и на эволюцию первых сухопутных позвоночных.

Неопределенность, вызванная датировкой первых следов позвоночных на суше, была отчасти разрешена в 2010 году, когда в морских осадочных породах у южной границы современной Польши обнаружили другие следы — возрастом 395 млн лет, то есть относящиеся к среднему девону. Эти отпечатки, часть которых свидетельствует о существовании пальцев, на 18 млн лет старше следов первых четвероногих. Помимо прочего,

по следам видно, что животное было способно к типу движения передних и задних лап, которое невозможно для рыбоподобных существ вроде тиктаалика или его возможного потомка акантостеги.

Животное, которое оставило эти следы, было для своего времени очень крупным, около 2,5 м в длину. Возможно, оно было падальщиком и подбирало останки организмов в полосе прибоя, а может, питалось сухопутными членистоногими, в том числе скорпионами и пауками.

Окаменелости первых четвероногих датируются 360 млн лет назад, значит, переход к этой форме организмов произошел в интервале 400–360 млн лет назад. Это время характеризуется быстрым падением уровня кислорода, и появление первых четвероногих приходится на период минимального содержания кислорода в атмосфере согласно кривой Бернера. Похоже, впрочем, что переход от рыб к амфибиям на самом деле имел место намного раньше — в период, близкий по времени к показателю самого высокого для девона уровня атмосферного кислорода, хотя уже и на этапе снижения.

Наши знания об этих судьбоносных процессах проистекают из весьма немногих источников — мест, где можно обнаружить ископаемые ранних четвероногих, в первую очередь это области в Гренландии, где таких останков особенно много. Хотя род ихтиостега называют первым из четвероногих, на самом деле первым был другой род — вентастега, его останки датируются 363 млн лет назад, а за ним последовала скромная линия потомков, в которую входят ихтиостега, акантостега и гинерпетон.

Ихтиостеги были самыми известными, пока не появился тиктаалик, хотя, возможно, его просто разрекламировали. Тиктаалик был рыбой, тогда как ихтиостега оказалась земноводным. Кости ихтиостеги впервые обнаружили в 30-е годы XX века, но это был не весь скелет, и полная реконструкция появилась только в 50-е годы. Это животное обладало хорошо развитыми лапами, но рыбьим хвостом. В более поздних исследованиях представлены выводы, что оно, вероятно, не могло ходить или ползать по суше: изучение ее стопы показывает, что ихтиостега не могла опираться на лапу подобного строения и потому обитала на мелководье, чтобы тело поддерживалось скорее водой, чем лапами.

Породы в Гренландии, в которых были обнаружены ихтиостега и другие примитивные четвероногие, образовались во времена, следовавшие сразу за позднедевонским массовым вымиранием, причиной которого почти наверняка послужило уменьшение количества атмосферного кислорода, что привело к кислородной недостаточности (аноксии) в океанах. Появление ихтиостеги и ее собратьев могло стать реакцией на вымирание, поскольку эволюционные новинки всегда являются попыткой занять новые экологические ниши после вымираний. Однако род ихтиостеги просуществовал совсем недолго: палеонтологическая летопись свидетельствует, что несколько миллионов лет.

Существование в позднем девонском периоде рода ихтиостеги поднимает ряд вопросов. Если это и правда были первые сухопутные четвероногие, то почему не последовала радиация их потомков? Прошло очень много времени, прежде чем появились другие амфибии. Такой длительный временной разрыв является головной болью многих палеонтологов. Этот интервал назвали разрывом Ромера в честь палеонтолога начала XX века Альфреда Ромера, который первым обратил внимание на загадочную пустоту между первой и второй волнами освоения суши позвоночными. На деле ожидаемое распространение земноводных началось лишь около 340–330 млн лет назад, а значит, разрыв Ромера длился по крайней мере 30 млн лет.

В 2004 году Джон Лонг и Малкольм Гордон в своем исследовательском отчете указали, что четвероногие, в том числе рыбы с лапами, жившие во времена низкого уровня

атмосферного кислорода (в период 370–355 млн лет назад), были исключительно водными обитателями, хотя некоторые из них не имели жабр. Дыхание осуществлялось подобно дыханию многих современных рыб — заглатыванием воздуха, а также проникновением кислорода через кожу. Они не были земноводными в нашем современном понимании, то есть существами, которые проводят свою взрослую жизнь на суше. И, по-видимому, ни одно из девонских четвероногих не проходило в своем развитии стадию головастика.

Долгий период предположительно без земноводных закончился в 2003 году вместе с открытием Дженни Клэк. Осматривая старые музейные экспонаты, она наткнулась на ископаемое, ошибочно отнесенное к водным существам-рыбам. Клэк доказала, что это — четвероногое, у него есть пять пальцев и строение скелета, позволяющее жить на суше. Ископаемому дали новое имя — педерпес. Существовало это животное значительно позднее тиктаалика. Оно-то как раз может оказаться самым первым земноводным. Период его существования — 354–344 млн лет назад, как раз во время разрыва Ромера. Эта находка, как это часто бывает с ископаемыми, породила больше вопросов, чем ответов: данное четвероногое «утверждает», что прямо в разгар разрыва Ромера у амфибий появились лапы, которые позволяли передвигаться по суше, однако остается невыясненным, могло ли оно дышать воздухом или просто иногда выползло из воды на несколько минут.

Альфред Ромер полагал, что эволюцию первых земноводных стимулировали изменения содержания кислорода в среде обитания. По его мнению, двоякодышащие, или похожие на них девонские существа, были привязаны к маленьким прудам, и недостаток кислорода в этих прудах, возникающий из-за естественных процессов, например, пересыхания, стал эволюционным толчком для развития легких. Потенциальные земноводные вынужденно оказывались на воздухе, и постепенно те животные, у которых развилась способность выживать на открытом воздухе, получили преимущество. У них по-прежнему сохранялись жабры, но также появились и примитивные легкие.

Переход от водных четвероногих, вроде ихтиостеги или, скорее всего, педерпеса, имел промежуточный этап — тиктаалика, после которого у животных развились запястья, лодыжки, позвоночник и прочие элементы остового скелета, которые облегчали дыхание и передвижение. Ребра важны для поддержания легких, а необходимость поддержания тела в воздушном пространстве предполагает значительные изменения в строении плечевого пояса, тазовой области, а также в мягких тканях вокруг них. Тех животных, которые развили у себя все эти признаки, и можно называть первыми сухопутными земноводными. Но интенсивная радиация новых видов земноводных, которой можно было бы ожидать сразу после появления у них легких и развитого опорно-двигательного аппарата, началась только 340–330 млн лет назад. Впрочем, радиация эта была весьма бурной, и к концу раннего карбона (около 318 млн лет назад) во всех уголках планеты обитало множество амфибий.

Согласно данным исследований ископаемых, можно предположить, что преобразование организмов из рыб в морфологический тип земноводных могло случиться дважды, а то и трижды. Первый случай имел место около 400 млн лет назад, что подтверждается отпечатками лап, найденными в Ирландии, а также открытием останков тиктаалика. Второй — около 360 млн лет назад, и третий — около 350 млн лет назад. Ихтиостега, которую очень долго принимали за первое сухопутное позвоночное, возможно, была очень близка к рыбам, а факт, что у нее не было жабр, не обязательно означает исключительно наземный образ жизни. Сегодня известно более сотни различных видов рыб, имеющих не только легочное дыхание, но и жабры. У 68 видов этих сохранившихся до нашего времени рыб легочное дыхание развилось независимо, что свидетельствует об активном использовании животными этого способа адаптации к среде. Ихтиостега, возможно, даже не входила в основную линию

предков прочих четвероногих, но принадлежала к животным, которые в процессе своего развития вернулись в воду, — к этому ее вынудили примитивные легкие и снижение уровня атмосферного кислорода в позднем девоне.

Давно принято считать, что первые амфибии были пресноводными, в связи с этим встает один из основных вопросов истории развития жизни: все ли сухопутные животные обязательно эволюционировали из промежуточных пресноводных форм, или некоторые организмы перешли к сухопутному образу жизни непосредственно из моря? По последним данным, древние лопастеперые рабы и двоякодышащие рыбы — непосредственные предки первых четвероногих — были в основном морскими организмами. Кроме того, палеонтолог Майкл Лорин отмечает, что в некоторых зонах обнаружения ископаемых отложений каменноугольного периода, которые всегда считались примерами древних пресноводных сред обитания, могли также присутствовать морские отложения или близкие к ним, например, характерные для зоны прибоя или лагуны. Несомненным остается то, что и знаменитый тиктаалик, и другие древние амфибии, например, ихтиостега или акантостега, были определены как пресноводные формы корректно. Таким образом, похоже, что места обитания ранних земноводных и похожих на них животных были самыми разнообразными: соленая вода, пресная вода, а также сухопутные среды позднего палеозоя. Но тогда получается интересная вещь: современные земноводные не переносят соленой воды, их кожа, через которую проникает кислород при погружении в воду, не может функционировать в соленой среде. Должно быть, эта их особенность сформировалась намного позже.

В заключение отметим, что освоение суши происходило в два этапа, каждый из них соответствует периоду высокого уровня атмосферного кислорода. В промежутке между этими периодами, во времена девонского массового вымирания и разрыва Ромера, сухопутная жизнь почти отсутствовала. Поэтому разрыв Ромера должен быть расширен, чтобы включить в себя также членистоногих и хордовых^[154]. Этот малоосвоенный сухопутными существами промежуток времени закончился в каменноугольном периоде (в Америке его принято подразделять на ранний (нижний) и поздний (верхний) периоды — Миссисипский и Пенсильванский соответственно). Когда уровень кислорода резко вырос на последних этапах каменноугольного периода и далее, в пермском периоде, достиг небывалых показателей в 32–35 % от общего объема всех газов в атмосфере, в истории планеты начался удивительный этап — время гигантов.

Глава 11

Эпоха членистоногих:

350–300 миллионов лет назад

Непосредственно после Второй мировой войны, на заре ядерной эпохи, Голливуд штамповал фильмы о «гигантских чудовищах, порожденных воздействием радиации»: иногда эти чудовища являлись когда-то вымершими существами, ожившими в результате таяния ледника, в котором они покоились с незапамятных времен, но чаще в этой роли выступали знакомые насекомые, скорпионы, пауки огромных размеров. Конечно, все это кино было «ненаучно», но тем не менее давайте зададим резонный вопрос: какого же максимального размера может достичь животное с определенным строением тела? Поскольку большие размеры зачастую служат защитой от хищников, то, по-видимому, большинство организмов должно стремиться к максимально возможным размерам. Каковы окончательные пределы роста животных? В случае с сухопутными членистоногими (пауками, скорпионами, многоножками и стоножками, насекомыми и другими группами) ясно, что их рост ограничен двумя основными особенностями их морфологии, которые не позволяют им вырасти до размеров млекопитающих.

Во-первых, это экзоскелет. Из-за свойств хитина — очень твердого, крепкого вещества, из которого в основном этот экзоскелет состоит, — любое гигантское членистоногое, например, муравей, скорпион или богомол, просто не сможет двигаться, конечности не выдержат. Во-вторых, размеры членистоногих ограничены особенностями их дыхания. В организм насекомых или паукообразных может попасть только определенное количество кислорода. Ни одно современное насекомое не достигает длины, превышающей 15 см. В прошлом, однако, существовали значительно более крупные формы — в те периоды, когда уровень кислорода был максимальным.

Каменноугольный и пермский периоды — время высоких уровней кислорода в атмосфере

Хотя показатели уровней кислорода в древние периоды, указанные в разных исследованиях, часто не совпадают, все ученые единодушны в том, что содержание атмосферного кислорода достигло небывалых объемов в интервале 320–260 млн лет назад, максимальный показатель при этом приходится на конец данного временного отрезка Карбон (каменноугольный период, с непременным разграничением на ранний и поздний) и первая половина перми были периодами с очень высокими уровнями кислорода, и исследования мировой биоты, особенно насекомых, того времени с очевидностью показывают это.

Показатели уровня кислорода в карбоне (и не только они) очень хорошо описаны Ником Лэйном в книге 2002 года *The Molecule that Made the World* («Кислород: молекула, которая изменила мир»). В главе «Стрекоза Больсовера» Лэйн рассказывает об ископаемой стрекозе, обнаруженной в 1979 году, с размахом крыльев около 50 см. Известна еще более крупная ископаемая стрекоза каменноугольного периода с размахом крыльев около 76 см — это чудище назвали меганеврой. И большими были не только крылья: тела этих гигантов составляли почти 3 см в ширину и почти 30 см в длину, то есть размером примерно с современную морскую чайку. Размах крыльев современных стрекоз может достигать 10 см, но, как правило, они намного меньше.

Другими великанами того времени были мухи-поденки с размахом крыльев чуть меньше 50 см, пауки с лапами 45 см, а также многоножки и скорпионы длиной 180 см и даже больше. Скорпион длиной 90 см мог весить 22 кг и был, вероятно, весьма внушительным хищником среди сухопутных животных того времени, в том числе земноводных. Впрочем, как будет видно, у земноводных появились и свои гигантские виды.

Природа дыхательной системы насекомых, их способность насыщать кислородом самые потаенные уголки своего организма — фактор, серьезно повлиявший на их размеры. Все насекомые используют систему трубок-трахей, через которые воздух интенсивно прокачивается и попадает в ткани. Воздух поглощается из среды либо ритмичными движениями брюшка, либо с помощью махов крыльями, которые обеспечивают нагнетание воздуха в дыхательные отверстия. Система трахей, таким образом, устроена оптимальным образом для каждого из вариантов. Крылатые насекомые обладают наиболее высокой скоростью метаболизма по сравнению с другими животными. В результате экспериментов было установлено, что при повышении уровня атмосферного кислорода обмен веществ у стрекоз ускоряется. Значит, современные стрекозы и в размерах, и в отношении своего метаболизма зависимы от современного уровня кислорода — 21 %.

Вопрос о влиянии уровня кислорода на размеры членистоногих является спорным. Влияние подтверждается результатами наблюдений за маленькими морскими членистоногими, широко распространенными в современных океанах. Готье Шапелль и Ллойд Пек изучили две тысячи образцов из различных мест обитания и обнаружили, что в толщах воды, содержащих большее количество растворенного кислорода, членистоногие крупнее. Робертом Дадли из Университета Аризоны были проведены более тщательные эксперименты, в ходе которых плодовые мушки-дрозофилы выращивались в условиях с повышенным содержанием кислорода. Ученому удалось установить, что каждое последующее поколение подопытных становилось крупнее предыдущего, если в условиях эксперимента уровень кислорода повышался до 23 %. Что ж, по крайней мере, у насекомых высокие уровни кислорода стимулируют увеличение размеров ^[155].

Предполагается, что огромные размеры стрекоз были обусловлены не только объемами кислорода в атмосфере, но и более высоким атмосферным давлением. Парциальное давление кислорода возросло, но не за счет других газов. Общее давление газа было выше, чем сегодня, и большее количество молекул в атмосфере сделало возможным развитие гигантизма. Совершенно очевидно, что кислорода в атмосфере было больше, чем в наше время, но вот вопрос, почему?

Выше мы уже упоминали, что уровень кислорода сильно зависит от скорости накопления углерода и серосодержащих минералов, например, пирита (золота дураков). Когда накапливается большое количество органического материала, уровень кислорода повышается. Если это так, значит в карбоне — периоде с самым высоким за всю историю содержанием кислорода в атмосфере — вероятно, быстро накапливалось большое количество углерода и пирита, и стратиграфические исследования это подтверждают — вспомним о формациях угленосных отложений.

Рассмотрим интервал в 70 млн лет, более долгий, чем промежуток между последними динозаврами и современностью, который приходится на период с высоким уровнем кислорода — 330–260 млн лет назад. Оказывается, 90 % земных запасов угля обнаруживают именно в породах этого периода. Скорость образования угленосных отложений была тогда выше, чем в любой другой период истории Земли, — в 600 раз выше согласно тому, что пишет Ник Лэйн в книге «Кислород...». Однако термин «образование угленосных отложений» следует пояснить. Уголь — это останки древнего леса, а значит, мы говорим о времени, когда очень большое количество лесных массивов оказалось моментально погребенным под новой порослью, и лишь потом тепло и давление превратили их в уголь. Карбон был периодом захоронения лесов в немыслимых масштабах.

В отложениях органических материалов во времена карбона встречаются не только наземные растения. Много углерода есть и в океане, где его присутствие обусловлено наличием фито- и зоопланктона, морского эквивалента лесов, послужившего источником большого количества богатых органикой осадков на морском дне. Причины подобного беспрецедентного накопления углерода, которое привело к уникально высоким уровням кислорода, заключены в совокупности нескольких геологических и биологических событий. Во-первых, материки в то время объединились в один большой континент, закрыв древний Атлантический океан: Европа столкнулась с Северной Америкой, а Южная Америка — с Африкой. А вдоль границы столкновения этих материковых блоков вырос огромный горный массив.

По обеим сторонам этой горной цепи возникли широкие пойменные равнины, а расположение гор создавало условия для влажного климата почти повсеместно на сухопутной части планеты. Недавно появившиеся деревья заполнили обширные болотистые области, а также примыкающие к ним относительно сухие участки. Многие из этих деревьев показали бы нам диковинными и причудливыми, и одной из их странностей являлась очень неглубокая коревая система: вырастая очень высокими, деревья просто падали без достаточной поддержки. И в наши дни много упавших деревьев, но такого мощного накопления углерода не наблюдается. Значит, должна была существовать и более серьезная причина, кроме идеальных условий произрастания.

Леса 375 млн лет назад состояли из первых настоящих деревьев, для своей опоры в пространстве вырабатывавших лигнин и целлюлозу. Лигнин — очень прочное вещество, сегодня разлагается под действием различных бактерий. Но даже спустя 400 млн лет бактерии, которые этим занимаются, по-прежнему не прочь отдохнуть ^[156], и поэтому упавшие деревья разлагаются долго, а некоторые, например, более твердые породы, в

которых содержится больше лигнина, чем в так называемых мягких породах, — очень долго.

Разложение дерева является процессом окисления большей части углерода в дереве, поэтому, даже если конечный продукт в конце концов оказывается захороненным, в геологические отложения попадает очень мало восстановленного углерода. В каменноугольном периоде многие, а возможно и все, бактерии, способствующие разложению деревьев, по-видимому, еще не существовали^[157], так как микроорганизмы тех времен были, как предполагается, не способны разрушить лигнин. Деревья падали, но не разлагались. Постепенно эти неразложившиеся деревья оказывались захороненными под другими деревьями и прочим, и восстановленный углерод — вместе с ними. Все эти деревья и морской планктон производили кислород в процессе фотосинтеза, но очень мало кислорода тратилось в процессах разложения, а леса все росли и росли, что и привело к значительному увеличению уровня кислорода.

Кислород и лесные пожары

Пиковый уровень содержания кислорода в атмосфере в карбоне, помимо гигантизма, имел и другие последствия. Кислород активно поддерживает горение: чем больше кислорода в среде, тем сильнее огонь. Кислород облегчает возгорание, а топлива было сколько угодно — обширные леса карбона.

Рассматриваемый геологический период, возможно, был временем самых катастрофических лесных пожаров во всей истории планеты (если не считать последствий падения Чиксулубского астероида около 65 млн лет назад). Как и в исследованиях в области изменений уровней кислорода, в работах о древних лесных пожарах, вызванных высоким содержанием кислорода в атмосфере, присутствуют весьма противоречивые выводы, но противоречия с появлением новых данных постепенно снимаются. На деле критике подвергается вся теория о несовпадении древних уровней кислорода и современных показателей, в том числе утверждение о том, что в древности уровень был выше. Предполагалось, что древние леса должны были полностью погибнуть в глобальных пожарах, но, поскольку существует множество ископаемых, указывающих на наличие больших лесных массивов, катастрофических пожаров не было.

Атмосферные условия с высоким содержанием кислорода хотя бы теоретически должны способствовать быстрому распространению огня и пожарам большой интенсивности. Окаменелый древесный уголь в осадочных породах карбона в Северной Америке ^[158] свидетельствует, что в тот период лесные пожары случались и были более обширными, частыми и интенсивными, чем современные, хотя сравнение не совсем корректно ввиду биологической несопоставимости древних лесов и современных.

Если имели место такие крупные пожары, то у растений неизбежно должны были выработаться защитные механизмы против них. Растения эволюционировали и приобрели целый ряд хорошо известных качеств: кора стала толще и плотнее, система сосудов оказалась глубоко внутри организма растения, волокнистые корни стали располагаться вокруг основного корневого ствола.

Можно все же спросить, почему в карбоне пожары не уничтожили леса совсем. Хотя в те времена, как предполагается, пожары были частыми, приспособляемость деревьев и общее высокое содержание влаги как в самих растениях, так и в окружающей болотистой среде в целом сокращали ущерб. Впрочем, важно помнить и о температуре, с которой начинался пожар: при низком уровне кислорода в воздухе (11–12 %) растение гореть не будет. Впрочем, исследователи, проводившие эксперименты ^[159], пытались разжечь огонь спичкой, но не учли возможность возгорания от молнии.

Воздействие высокого уровня кислорода на растения

Растениям, как и животным, для жизни необходим кислород. Кислород попадает в клетки растений в процессе фотодыхания, но объемы его значительно меньше, чем те, в которых нуждаются животные. Еще одно отличие в том, что разным наземным растениям нужно разное количество кислорода. Большинство растений живут в двух очень разных средах: на воздухе и в почве (корни). Условия почвы — вода, твердая среда, газы — потребовали специфических эволюционных приспособлений. Листья же находятся на воздухе, их проблемы — не потерять слишком много воды, но и не накопить ее слишком много (при наводнениях, например), получить достаточное количество света. Корни в основном беспокоятся (если они на самом деле беспокоятся) о том, о чем листья не задумываются — о достаточном количестве кислорода. Именно корневая система наиболее уязвима в вопросе повреждений или даже гибели от недостатка кислорода, и это известно всем огородникам и любителям комнатных цветов, которые иногда «заливают» свои растения. Корни находятся в среде, где недостаток кислорода может ощущаться очень остро, особенно если в почве слишком много воды, даже при условии, что атмосфера хорошо насыщена кислородом. Например, дыхание корней может быть затруднено, если в почвенных водах мало кислорода.

Как влияет на растения высокий уровень кислорода в среде? По этому вопросу не так много данных, но предполагается, что большое количество кислорода для растений вредно. Повышенное содержание кислорода в атмосфере приводит к усилению фотодыхания, но более серьезным последствием является то, что при большом количестве кислорода возникает больше токсичных веществ, называемых ОН-радикалами (гидроксильными радикалами), которые опасны для живой клетки. Чтобы глубже изучить этот вопрос, Дэвид Бирлинг, ученик Роберта Бернера из Йельского университета, выращивал в закрытых резервуарах различные растения в условиях с уровнем кислорода более высоким, чем в современной атмосфере^[160]. Когда уровень кислорода достиг 35 % (именно этот показатель каменноугольного и пермского периодов принято считать наивысшим за всю историю развития планеты), чистый прирост (измерялся рост растений) уменьшился на 20 %. Возможно, большие объемы кислорода в карбоне и раннем пермском периоде привели к снижению интенсивности растительной жизни, хотя это невозможно определить по ископаемым останкам, поскольку никаких значительных изменений или массового вымирания в этом временном интервале не прослеживается.

Кислород и развитие сухопутных животных

Завоевание суши позвоночными потребовало многочисленных эволюционных изменений. Наиболее важной была адаптация к новому способу размножения, который бы позволял развитие эмбриона из яйца вне воды. Амфибии позднего карбона и перми, по всей вероятности, продолжали откладывать яйца в воде, то есть не использовали возможности суши, где не было рек или озер. Эту проблему решило появление так называемого амниотического яйца. Предположительно именно такое яйцо обеспечило развитие направления эволюции, которое мы называем рептилиями, или пресмыкающимися. Эволюция амниотического яйца в дальнейшем привела к разделению потомков предков-амфибий на рептилий, птиц и млекопитающих.

Согласно исследованиям ископаемых, амниоты являются монофилетической группой, то есть происходят от одного общего предка. Иными словами, предполагается, что амниотическое яйцо не появилось в нескольких независимых друг от друга случаях. Этот общий предок — земноводное — жил в раннем карбоне, а значит, это замечательное событие произошло в период увеличения уровня кислорода. Первые амниотические яйца, вероятнее всего, появились при уровне кислорода, равном современному или немного выше.

Рептилии также считаются монофилетической группой, произошедшей от одного вида, который отделился от земноводных в раннем карбоне более 320 млн лет назад. Как уже говорилось, уровень кислорода в тот момент повышался, это было время интенсивного развития разнообразия амфибий, как сухопутных, так и водных. Хотя генетические исследования показывают, что отделение рептилий от земноводных может быть отнесено к периоду 340 млн лет назад, ископаемые, которые принято приписывать первым рептилиям (то есть отличать их от сухопутных амфибий), относятся к разным геологическим слоям. Например, останки маленьких пресмыкающихся гилономус и палеотирис были найдены в окаменелостях дерева позднего карбона, и представляется, что данные ископаемые образцы рисуют более правдивую картину происхождения рептилий, чем предположение об эволюции этой группы в раннем карбоне. Так или иначе, первые рептилии были очень малы, около 10–15 см в длину.

Череп этих рептилий не имеют ушного отверстия, барабанной перепонки у них не было, слух либо был очень плохим, либо отсутствовал. В отличие от земноводных-лабиринтодонтонтов у ранних рептилий не было пары больших клыков, присутствующих у крупных плотоядных амфибий, но зато у первых настоящих рептилий имелся сильный заднечерепной скелет, который позволял хорошо ползать и карабкаться по скалам и ветвям деревьев. Кроме того, у них был длинный, соразмерный туловищу хвост.

До сих пор нельзя достоверно установить, откладывали ли эти животные амниотические яйца. Ископаемые яйца в породах не встречаются до раннего пермского периода, и упомянутая выше единственная находка вызывает сомнения. Вероятно, эволюционный путь к амниотическому яйцу лежит через развитие яйца наподобие яиц (икры) земноводных, то есть без специальной оболочки, сохраняющей воду. Откладывали такие яйца во влажную землю, на суше. Для размножения исключительно в сухопутных условиях потребовались эволюционные этапы для развития нескольких оболочек (серозы, амниона), покрытых кожистой оболочкой или твердой, но пористой скорлупой. Кажется, в исследовательских трудах еще никогда не упоминалась вероятность того, что эти ранние четвероногие развивались как живородящие, то есть эмбрион не покидал тела самки до момента своего относительно полного созревания.

Яйца, из которых могли бы появляться жизнеспособные детеныши, в конце концов стали откладывать на суше, и уровни кислорода и тепла сыграли свою весьма значительную роль в развитии амниотических яиц. Вообще, для всех яйцекладущих животных размножение является вопросом сложного компромисса: в яйце должна сохраняться влага, поэтому отверстия в скорлупе должны быть малы и малочисленны, чтобы не допускать пересыхания, но при сокращении испарения приток кислорода внутрь яйца также уменьшается^[161].

Яйцо без кислорода развиваться не может, поэтому первые амниоты неслучайно появились в период с высокими показателями атмосферного кислорода. Очевидно, что яйцекладущие животные были и остаются зависимыми от объемов кислорода в атмосфере, поскольку более высокое содержание этого газа приводит к ускорению развития эмбриона. Высокий уровень кислорода может обеспечивать и живорождение. Некоторые биологи полагают, что живорождения в те времена быть не могло, так как, по крайней мере, у млекопитающих плацента обеспечивает меньший приток кислорода к зародышу даже по сравнению с содержанием кислорода в крови матери. Это предположение верно только для млекопитающих, у которых размножение происходит в организмах, способных регулировать температуру, количество жидкости и кислорода. Рептилии имеют совершенно иную систему воспроизводства. Возможно, низкие уровни кислорода даже способствуют живорождению. Подтвердить это можно тремя примерами. Во-первых, хорошо известно, что птицы (яйцекладущие организмы), живущие на больших высотах, обычно кормятся на еще большей высоте, чем максимальная высота их среды обитания, в которой они размножаются.

Многие высокогорные птицы регулярно подтверждают это правило: их гнезда находятся не выше 5500 м, на большей высоте зародыши нормально развиваться не могут^[162]. Хотя на такое ограничение могут влиять три фактора (по мере увеличения высоты уменьшаются уровень кислорода, уровень влажности, а также температура), уровень кислорода представляется наиболее важным из всех.

Второй пример возможности живорождения у рептилий в определенных условиях можно позаимствовать из результатов эксперимента Джона ван ден Брукса из Йельского университета, который изымал яйца аллигатора из естественной среды и помещал их в условия с высоким содержанием кислорода. Его исследования показали, что зародыши при высоких показателях кислорода развивались на 25 % быстрее, чем контрольная группа яиц, развивавшаяся в естественных условиях. Высокий уровень кислорода, очевидно, ускоряет развитие зародыша, по крайней мере, у американских аллигаторов.

В-третьих, Рей Хьюи из Вашингтонского университета указывает на то, что среди рептилий, обитающих в высотных экосистемах, большее количество видов являются живородящими, чем среди тех, кто обитает в низменных местах.

Как только четвероногие позвоночные отделились от своих предков-рыб, им потребовалось решить множество анатомических проблем. Их тела больше не поддерживались водным пространством, а на воздухе и опора, и передвижение должны были осуществляться при помощи четырех конечностей. Требовалось совершенно новое строение плеча и таза в совокупности с мускулатурой, способной обеспечивать длительное передвижение. Кроме того, возникла проблема необходимого количества кислорода для осуществления разнообразных движений на суше. По видимости, первые четвероногие использовали одни и те же мышцы для передвижения и дыхания и не способны были делать и то и другое одновременно. У рыб, очевидно, не возникало проблем с постоянным передвижением и одновременным дыханием, так что уровень содержания кислорода не ограничивал обычную жизнедеятельность.

У сухопутных четвероногих все было сложнее. Морфология тела первых сухопутных

четвероногих обеспечивала ползающие движения, лапы при этом находились по бокам туловища. При ходьбе или беге такое строение предполагает, что тело изгибается сначала в одну, потом в другую сторону, как синусоида. Когда левая лапа перемещается вперед, правая сторона тела и правая часть легких вместе с ней сжимаются, потом то же самое происходит с левой стороной тела при шаге правой лапой.

Искривление груди при таком способе передвижения делает «нормальное» дыхание невозможным, каждый вдох должен производиться между шагами. Но тогда при быстром перемещении — беге — вообще нельзя дышать. Современные земноводные и пресмыкающиеся не могут бегать и дышать одновременно, и можно спорить, что их палеозойские предки были такими же. Поэтому среди рептилий нет спринтеров, и поэтому хищники из числа амфибий и рептилий всегда нападают внезапно, например, из засады, а не загоняют свою жертву. Наилучшим примером таких небегущих хищников является варан с острова Комодо, который может пробежать за жертвой не более 8–9 м. Подобную неспособность рептилий к быстрому перемещению называют ограничением Каррьеера в честь открывателя этого явления, физиолога Дэвида Каррьеера.

Проблема невозможности одновременно дышать и бегать стала большим препятствием в освоении суши животными. Первые сухопутные четвероногие сильно проигрывали даже сухопутным членистоногим, например, скорпионам, поскольку позвоночные были медлительными и все время делали остановки, чтобы вдохнуть. Поэтому мы заявляем — уровень кислорода был чрезвычайно высок, поскольку только в таких условиях было возможно развитие первых сухопутных позвоночных.

Одним из результатов такого развития стало появление у земноводных и пресмыкающихся трехкамерного сердца. Сердце такого типа присутствует у большинства современных земноводных и пресмыкающихся, оно приспособлено обеспечивать дыхание существам, испытывающим сложности с получением кислорода при передвижении. Когда ящерица преследует добычу, она не дышит, поэтому четвертый отдел сердца, перекачивающий кровь к легким, был бы для нее лишним, три отдела перегоняют кровь по всему телу. Но такому удобству есть своя цена — когда ящерица перестает двигаться, ей требуется много времени, чтобы восстановить уровень кислорода в крови.

Кислород и температура, размножение и терморегуляция

Обсудим вопросы различных способов размножения у сухопутных животных и попытаемся понять, как связаны размножение и уровни кислорода и температуры.

Итак, есть два возможных варианта: яйца и живорождение. Яйца покрыты либо твердой известковой скорлупой, либо более мягкой кожистой оболочкой. Сегодня все птицы кладут яйца с твердой скорлупой, а все рептилии — с мягкой кожистой. К сожалению, информации о соотношении степени проникновения кислорода сквозь кожистую скорлупу-оболочку и сквозь твердую известковую очень немного.

Выбор того или иного способа размножения имеет для животного весьма значимые последствия. При живорождении зародыши не испытывают проблем с температурным балансом, потерей влаги или удушьем, но зато при вынашивании матери требуется больше пищи, увеличивается объем ее тела, что делает ее весьма уязвимой для хищников. Яйцекладущие не обременены этими сложностями, но им нужно считаться с неустойчивыми условиями внешней среды, в которую попадают яйца, — наличием хищников, воздействием погодных и иных физических условий, поэтому процент гибели зародышей у яйцекладущих выше, чем у живородящих.

К концу раннего карбона развились три основные линии рептилий, сформировавшие независимые группы: одни эволюционировали в млекопитающих, другие — в черепахах, а третья группа дала жизнь прочим пресмыкающимся и птицам. Относительно подробная ископаемая летопись показывает, что в эти три группы входило множество разнообразных отдельных видов. Также, исходя из данных об ископаемых, следует по-новому определить, что же такое «рептилия». Традиционно в этот класс включают современных черепах, ящериц и крокодилов. Технически определение рептилиям можно дать методом от противного — сказать, кем они *не* являются: это амниоты, которые не имеют признаков, характерных для птиц и млекопитающих. Менее исследованным моментом является то, что все три упомянутые линии эволюции рептилий возникли в мире с очень высоким уровнем кислорода и активным оледенением. Предположим, что осуществление эволюции в холодных, но очень насыщенных кислородом условиях серьезно повлияло на многие аспекты биологии этих животных. Каковы же их основные характеристики?

Одной из постоянных в исследованиях по истории развития жизни является проблема терморегуляции организмов. Существуют три основных способа: эндотермия (теплокровность), экзотермия (холоднокровность) и гомотермический способ, который связан с очень большими размерами. Развитие каждого из этих способов уже давно является предметом пристального изучения, а вопросы особенностей терморегуляции (в том числе вопрос, были ли динозавры теплокровными) остаются одними из наиболее дискутируемых. Решение проблемы осложняется тем, что, как правило, физиологические особенности и части тела, отвечающие за терморегуляцию (например, шерсть), редко оставляют ископаемые останки.

Мы знаем, что все млекопитающие и птицы — теплокровные; у первых есть шерсть, у вторых — перья. Нам также известно, что все современные рептилии — холоднокровные, и у них нет ни шерсти, ни перьев. По поводу вымерших форм не утихают споры. Наиболее любопытен вопрос о влиянии уровней кислорода и/или мировых температур на терморегуляцию и особенности кожного покрова различных групп животных.

Различия групп пресмыкающихся

Разграничение трех основных генетических линий пресмыкающихся удобно проводить в зависимости от количества отверстий в черепе^[163]: у анапсид (предков черепах) на черепе не было височных окон (впадин), у синапсид (предков млекопитающих) имелось по одной с каждой стороны черепа, у диапсид (динозавры, крокодилы, ящерицы, змеи) — по две. Согласно ископаемым данным все три группы зародились в период высокого уровня атмосферного кислорода^[164].

Самый ранний представитель третьей группы (диапсид) известен по останкам в слоях позднего карбона. Он был маленьким — около 20 см в длину. Со времени своего появления и до начала падения уровня кислорода, которое, вероятно, стало по-настоящему заметным около 260 млн лет назад (в середине и второй половине пермского периода), эта группа не продемонстрировала большого разнообразия видов. Хотя в позднем карбоне и потом, в пермском периоде (высший пик содержания кислорода в атмосфере), произошло некоторое разделение диапсид на подгруппы. На размеры это не повлияло, эти животные оставались маленькими, похожими на ящериц. Нет никаких свидетельств тому, что первые диапсиды могли бы быть предками динозавров — крупнейших из всех животных за всю историю Земли. Если высокий уровень кислорода повлиял на гигантизм насекомых, то о диапсидах такого точно не скажешь.

Основные вопросы по этой группе: являлись ли они теплокровными и как размножались. Яиц пермского периода, которые однозначно относились бы хоть к одной из всех трех генетических групп, в ископаемых отложениях не найдено. Предполагается, что примитивные амниотические яйца с кожистой скорлупой откладывали на суше. Доказать факт живорождения мы не можем. Только в конце перми, во время кислородного кризиса, который закончился одним из крупнейших массовых вымираний, у диапсид стало наблюдаться эволюционное движение к разнообразию, благодаря которому они так знамениты. В конце концов динозавры от них все-таки произошли.

Особенностью эволюции диапсид стали формы, позволяющие двигаться. Они были проворными плотоядными.

Другая группа рептилий, анапсиды, развивалась иначе. Вряд ли можно упрекнуть в проворстве черепах, а именно ими и стали анапсиды, на промежуточном этапе представлявшие собой громадные медлительные чудища, известные как парейазавры. Это были одни из самых крупных рептилий позднего пермского периода.

Однако, глядя на самых ранних анапсид, трудно предположить, что они станут медлительными и будут прятаться в панцирь. Первоначально анапсиды были маленькими, быстрыми и интенсивно развивались в позднем карбоне, но в пермском периоде все изменилось. С окончанием оледенения, длившегося первую половину перми, они приобрели гигантские формы — котилозавры и еще более крупные парейазавры. Это были большие травоядные животные с окостеневшими пластинками на спине и голове, существовавшие в самом конце пермского периода. Возможно, их гигантский рост обуславливается высоким уровнем кислорода.

Последняя из трех групп ранних рептилий — синапсиды, которые стали и нашими предками. В отличие от диапсид предки млекопитающих эволюционировали в позднем карбоне и в течение пермского периода в самые разнообразные формы. Как и диапсиды, наиболее примитивные представители наших предков известны по ископаемым из пластов позднего карбона, и, так же как и диапсиды, они были маленькими, похожими на ящериц по

форме и, вероятно, образу жизни. Предполагается, что они были холоднокровными, как диапсиды и их общие предки-амфибии. В свою очередь, синапсиды являются предками двух больших групп: пеликозавров (например, раннепермский диметродон) и терапсид — древнего отряда животных, положивших начало развитию млекопитающих. Эту последнюю группу еще называют звероподобными рептилиями.

Синапсиды, как уже упоминалось, достигли большого разнообразия в период высокого содержания кислорода в атмосфере и в момент кислородного пика были самой разнообразной группой сухопутных позвоночных. В позднем карбоне пеликозавры, вероятно, выглядели как большие ящерицы или даже современные игуаны, лапы располагались по бокам тела, и образ передвижения и жизнедеятельности у них был соответствующий. К концу позднего карбона они достигли размеров варанов Комодо и, возможно, были грозными хищниками. Около 300 млн лет назад, в начале пермского периода, они составляли по крайней мере 70 % всей сухопутной фауны позвоночных. Столь же разнообразными были их пищевые предпочтения: установлено наличие трех основных групп — питавшихся рыбой, мясоедов и травоядных (первые крупные травоядные).

И хищники, и их жертвы могли достигать 4,5 м в длину, а у некоторых, например, диметродона, на спине имелся большой парусообразный гребень, который придавал им еще более внушительный вид. Кроме того, они, изменив положение конечностей, частично или даже полностью решили общую для рептилий проблему невозможности одновременно дышать и передвигаться. Синапсиды развили способность перемещать лапы под туловищем, а не по бокам, как ящерицы. Это привело к формированию более поднятого над поверхностью положения тела и значительно снизило степень компрессии легких, которая наблюдается у ящериц и саламандр. Хотя у синапсид и наблюдается частичное положение конечностей по сторонам туловища, оно уже заметно меньше, чем у первых четвероногих. В эволюции терапсид в среднем пермском периоде можно проследить все более приподнятое положение тела.

«Парус» на спине как у плотоядных, так и у травоядных является ключом к пониманию обменных процессов в организмах пеликозавров. Это было приспособление, которое позволяло животному быстро прогреваться по утрам. Подставляя свой гребень солнечным лучам, и хищники, и потенциальные жертвы могли быстро согреться, чтобы хорошо двигаться. Животное, которое быстрее согревалось, становилось победителем в борьбе за выживание — работал естественный отбор. Но еще более важно учитывать то, что в период высокого уровня кислорода предки млекопитающих еще не были теплокровными. Когда же те возникли впервые теплокровность? Должно быть, у потомков пеликозавров — терапсид. Времена высокого уровня кислорода были также периодом относительно низких температур, большого оледенения, и значительная часть полярных областей в обоих полушариях была покрыта льдом, как континентальным, так и морским.

Несмотря на то что наше понимание эволюции пеликозавров опирается на ископаемые Северной Америки, в более поздних породах этого региона можно обнаружить уже относительно мало ископаемых позвоночных. Развитие терапсид хорошо прослеживается в Западной Европе и России, но даже в этих регионах картина перехода позвоночных к формам терапсид недостаточно полна из-за небольшого количества пород, содержащих окаменелости. «Затишье» в ископаемых синапсид охватывает период 285–270 млн лет назад. Историю развития этой группы описывают исходя в основном из данных, полученных в России в области Уральских гор и в Южной Африке в области пустыни Карру. Отложения в Карру появляются с периода ледниковых отложений возрастом, возможно, 270 млн лет, а далее там находятся пласты, в которых окаменелости формировались непрерывно до самого

юрского периода, что позволяет нам увидеть полную историю животных по этой линии развития.

Терапсиды распались на две группы: плотоядные формы (преимущественно) и травоядных животных. 260 млн лет назад оледенение из Южной Африки уже отступило, но, насколько мы можем судить, относительно высокие широты этой части Пангеи (около 60° южной широты) оставались прохладным регионом. Уровень кислорода был по-прежнему высок, точно выше современного, но постепенно положение менялось.

С течением пермского периода содержание кислорода в атмосфере уменьшалось. Появились две большие группы животных, причем в обеих существовали как хищники, так и травоядные. Вероятно, в период 270–260 млн лет назад основными сухопутными обитателями были дейноцефалы. Эти мощные животные достигали очень больших размеров, не таких, как динозавры, но крупнее любого современного млекопитающего, кроме, возможно, слона, а некоторые из самых крупных диноцефалов весили столько же, сколько слон. Например, представители широко известного рода мосхопс из Южной Африки имели высоту 5 м, огромную голову, их передние лапы были длиннее задних. И охотились на них хищники примерно такого же размера.

Диноцефалы и их хищные формы исчезли во время большого массового вымирания около 260 млн лет назад по неизвестным причинам. Существует очень мало данных о диноцефалах и их непосредственных потомках дицинодонтах и, соответственно, их хищных формах. Пока при раскопках в России и Южной Африке не будут получены новые сведения об этих животных, неопределенность в отношении их эволюции сохранится. Печально, но ископаемых, относящихся к тем временам, очень мало, и еще меньше — палеонтологических исследований в этой области, так что мы не знаем о развитии многих поколений животных и лишь надеемся, что будущие поколения исследователей продолжат искать и делать открытия.

Дицинодонты являлись самыми распространенными травоядными в период 260–250 млн лет назад. Во время пермского вымирания, которое будет описано в следующей главе, они почти полностью исчезли с лица земли. Хищники, охотившиеся на дицинодонтов, подразделяются на три группы: горгонопсы, которые вымерли в конце перми, немного более разнообразные в видовом отношении тероцефалы и цинодонты, от которых в триасовом периоде произошли млекопитающие.

Влияние уровней кислорода на размеры животных

Увеличение доли кислорода в атмосфере до рекордных показателей, превышающих 30 %, сопровождалось эволюцией насекомых, также достигших небывалых размеров. Гигантские стрекозы каменноугольного периода и следующего за ним пермского были самыми большими насекомыми за всю историю развития жизни на Земле. Многие специалисты признают, что причиной гигантизма насекомых могли послужить высокие уровни кислорода, хотя, возможно, это просто совпадение. Однако, действительно, дыхательная система насекомых предполагает проникновение кислорода по трубкам-трахеям, а во времена высоких уровней кислорода этот газ мог легче и быстрее проникать во все части крупных организмов. Итак, если насекомые могли вырасти вместе с ростом уровней кислорода, то как же позвоночные? Новые исследования показывают, что и для позвоночных это правило могло оказаться верным.

Палеонтолог Майкл Лорин в 2006 году измерил длину ископаемых черепов и тел различных рептилий, расположив данные в последовательности от карбона до конца перми, то есть охватив период 320–250 млн лет. Оба показателя демонстрируют определенную синхронность с изменениями уровня кислорода. С возрастанием уровня атмосферного кислорода в позднем карбоне происходило и увеличение размеров рептилий, а когда содержание кислорода в атмосфере начало снижаться (с середины пермского периода), размеры животных также начали уменьшаться. В главе, посвященной кайнозойским млекопитающим, мы отдельно остановимся на исследовании Пола Фальковски и его коллег, доказывающем зависимость размеров животных от уровней кислорода и в более поздние периоды.

Та же тенденция изменений размеров звероподобных рептилий в зависимости от колебаний уровней кислорода наблюдается и к концу пермского периода. Крупнейшие терапсиды всех времен — диноцефалы середины перми — пережили свой расцвет именно на кислородном пике. С падением уровней кислорода последующие разнообразные группы терапсид, в том числе дицинодонты, теряют в размерах, что можно заметить по уменьшению размеров черепов того периода.

В позднем пермском периоде продолжали существовать некоторые крупные формы, например, род «дицинодон» и даже плотоядные горгонопсы, но многие из них уже были заметно меньшего размера. Таксономические группы позднего пермского периода — кистецефалы, дииктодоны и некоторые другие — были очень малы. В одном из исследований 2007 года показано, что род листрозавров в раннем триасе был значительно меньше, чем в позднем пермском периоде. Такие же примеры демонстрируют различные цинодонты позднего пермского периода и раннего триаса, когда содержание кислорода в атмосфере стремительно уменьшалось.

Были в триасовом периоде и исключения: гигантские формы каннемейерий и тритилодонтов. Однако в целом терапсиды триаса намного меньше по сравнению с пермским периодом. Недавняя работа нашего коллеги (с недавних пор он работает в Вашингтонском университете) Кристиана Сайдора также подтверждает уменьшение размеров. Таким образом, существует очевидная связь между размерами сухопутных животных и уровнями кислорода в пермском и триасовом периодах. Больше кислорода — крупнее формы, меньше кислорода — животные также мельчают.

На заре эры млекопитающих

Музей естественной истории Пибоди в Йельском университете является крупнейшим собранием ископаемых в мире, а также в нем находится и крупнейшая коллекция живописи палеонтологической тематики.

Одну из больших стен Музея Пибоди украшают два огромных полотна, которые для нескольких поколений американцев являются хрестоматийными примерами того, как выглядела жизнь на определенных этапах своего развития. Одна картина называется «Эра рептилий» (ее писали три года, с 1943-го по 1947-й), другая — «Эра млекопитающих» (шесть лет работы, с 1961-й по 1967-й).

«Эра рептилий» начинается в темных болотах и заканчивается извергающимся вулканом, на фоне которого изображен тираннозавр рекс. «Эра млекопитающих» в начале демонстрирует джунгли, в которых можно увидеть как совершенно необычные, так и весьма привычные для нас растения. Также по ней можно проследить, как земноводные порождают рептилий, а те — млекопитающих. Нам же совсем не требуется рассматривать эти или любые другие картины, чтобы представить себе, как развивались группы позвоночных в те далекие времена. В частности, мы утверждаем, что существовали три отдельные «эры» млекопитающих (в данном случае мы подразумеваем, что «эра» — это всего лишь поэтический ярлычок, без каких-либо терминологических претензий).

Первой эрой млекопитающих был пермский период, золотые дни терапсид и их предков, синапсид. *Технически* они еще не были млекопитающими, но уже приближались к таковым. Эта таксономическая группа была весьма разнообразна по видовому составу и очень многочисленна. В Южной Африке обитало тогда до пятидесяти родов, а если принимать во внимание, что биологический род обычно включает несколько (а иногда и много) видов, реальные масштабы разнообразия на видовом уровне были очень велики, по самым консервативным оценкам, до 150 видов.

Современная Южная Африка не слишком отличается по географическим широтам и, возможно, климатически от Южной Гондваны примерно 255 млн лет назад. Сегодня там обитает 299 видов. Представьте себе сегодняшнюю африканскую саванну, только бродят по ней дицинодонты и много хищников: от горгонопсов размером с льва до териодонтов размером с горностаю. Многочисленные стада травоядных пасутся, но едят не траву, а кустистые папоротники, например, глоссоптерисы. Такова Африка времен первой «эры» млекопитающих.

Вторая «эра» млекопитающих — период между поздним триасом и концом мелового периода. Млекопитающие закрепились на планете. За ними присматривают хищные динозавры. Живут они в ограниченном количестве экологических ниш: в норах, на деревьях, выходят по ночам. Размером они не крупнее домашней кошки, а большинство из них — намного меньше. Только в палеогене млекопитающие приобрели какую-то значимость в экосистемах и проявили себя так, что в их честь назвали целую эру.

Наконец, третья «эра» млекопитающих. После мел-палеогенового вымирания мир стал быстро заполняться обитателями, которых мы знаем сегодня. Это уже хорошо известная нам история: развитие животных от форм, похожих на крысу, которые выжили после Чиксулубского астероида, и до первых млекопитающих-гигантов вроде титанотерия или уинтатерия (они были похожи на носорогов). А вскоре после них появились и привычные для нас существа.

До 2000 года первая эра млекопитающих изучалась в основном по образцам из пустыни

Карру в Южной Африке. С начала XXI века стали также известны ископаемые из Центральной Африки, обнаруженные Кристианом Сайдером, а также из России благодаря огромной коллекции, собранной палеонтологом Майклом Бентоном.

Иногда кажется, что вся эра динозавров — это просто какая-то большая мистификация. Казалось бы, один мощный поток излияния базальта — и история развития жизни повернулась бы совсем иначе. Человеческий разум 250 млн лет назад? Вполне возможно, ведь не так уж много времени прошло с тех пор, как обезьяны быстро стали более развитыми существами.

Глава 12

Массовое вымирание — дефицит кислорода и стагнация: 252–250 миллионов лет назад

Пустыня Карру в центральной части Южной Африки, скорее всего, разочарует любителей «настоящих» пустынь. Когда в одном предложении встречаются слова «Африка» и «пустыня», то воображение в первую очередь рисует знаменитые пески Сахары или Калахари. В Калахари, например, жизни почти нет, потому что пески там постоянно перемещаются, днем там очень жарко, а ночью очень холодно. Растениям и животным нелегко выживать в подобных местах, разнообразие и численность живых организмов там невелики, и неудивительно, что люди в этих пустынях также появляются весьма неохотно. Сельское хозяйство здесь почти отсутствует.

Пустыня Карру, в отличие от Сахары и Калахари, не имеет перемещающихся песков и дюн, в основном она состоит из каменистых пород, на которых хорошо развивается растительность, и кажется, не найти здесь места, где бы не было овечьего помета, что говорит о многочисленности этого завезенного вида. В Карру нет жирафов и слонов, гиппопотамов и крокодилов, буйволов и носорогов. Животные здесь водятся, а в некоторых местах их очень даже много, но это все не очень знаменитые африканские виды. Также здесь есть человеческие поселения — большие ранчо. Другими словами, Карру — не то место, которое может понравиться туристам — любителям пустынного экстрима. Но что здесь точно есть, так это большие отложения осадочных пород возрастом в сотни миллионов лет, а именно относящихся к периоду 270–175 млн лет назад.

Примерно посередине этого отложения находится самый лучший в мире участок разнообразной сухопутной ископаемой жизни, принадлежащей к периодам как до, так и после массового пермского вымирания — наиболее катастрофического из пяти крупнейших. Целые поколения палеонтологов начиная с середины XIX века изучали древние речные русла и долины, которые стали геологической основой пустыни Карру. Животные часто гибнут у реки либо от нападений хищников, либо по другим причинам, потом их останки постепенно погружаются в грязь и становятся окаменелостями. Область пустыни Карру до недавнего времени являлась основным местом исследований указанного геологического периода, однако недавно были обнаружены и другие ископаемые: Майком Бентоном, нашим коллегой из Бристоля, — в России, и Кристианом Сайдором из Вашингтонского университета^[165] — в республике Нигер. Впрочем, даже эти новые находки не сравнятся с богатством и качеством сохранности во времени образцов из Карру. При этом, конечно, надо понимать, что только энтузиасты, грезящие когда-нибудь раскопать оскаленный череп здорового хищника вроде тираннозавра, находят полевые работы палеонтологов захватывающими и не обращают внимания на трудности. На самом деле все образцы из пустыни Карру приходилось буквально выцарапывать из пород — пустыня Карру отдавала свои сокровища весьма неохотно.

Поездка из Кейптауна в центр Карру занимает весь день. Местность имеет небольшой подъем и постоянно повышается, и если ехать к северо-востоку Карру, то вскоре откроется вся геологическая летопись этого региона: от средней перми до «главы» о динозаврах юрского периода. Не только время проходит перед вашим взором сквозь сотни метров

осадочных пород этой области. Также перед вами предстанут и климатические различия эпох — от ледников до, возможно, самого жаркого времени в земной истории, а в промежуточный период продолжительностью в десятки миллионов лет вы станете свидетелями времени, когда содержание кислорода в атмосфере достигло минимума с момента появления первых животных на планете (около 600 млн лет назад). Многие можно понять, читая эти геологические «страницы», но есть среди них одна особая, которую исследуют намного тщательнее, чем все остальные.

Это — несколько сотен метров отложений возрастом 252–248 млн лет, породы, возникшие в течение последних тысячелетий пермского периода (и всей палеозойской эры, которая закончилась пермским периодом) и нескольких миллионов лет после массового вымирания 252 млн лет назад. Вот уже несколько десятилетий исследователи задают себе вопросы, связанные с ископаемыми тех времен, довольно редкими, но очень хорошо сохранившимися Во-первых, как долго длилось это массовое вымирание, начиная с первых признаков того, что данное событие превысило «нормальные» масштабы предыдущих вымираний? Во-вторых, мы хотим выяснить, совпадало ли по времени катастрофическое вымирание на суше с таким же по размаху вымиранием морских обитателей в пермский период. В-третьих (и это, наверное, самое интересное), каковы были причины этого события? Наконец, важно понять, насколько быстро сухопутные экосистемы восстановились, поскольку это поможет понять, как пережить другое, подобное пермскому, вымирание, потенциальная угроза которого намного реальнее, чем мы готовы осознать.

Перефразируя высказывание знаменито палеонтолога XX века Дэвида Раупа из Университета Чикаго, спросим себя: выжившие виды были более жизнеспособны или им просто повезло?

Результаты пермского массового вымирания

Причина, или, скорее, причины, пермского вымирания не находят единодушного объяснения в ученой среде, но с одним из выводов согласны все: последствия вымирания были настолько ужасны, что экосистемы восстанавливались очень и очень долго. Этим данное вымирание отличается от схожего события в меловом периоде (мел-палеогенового вымирания), когда также вымерло больше половины всех животных на планете, но восстановление биосферы после произошло относительно быстро. Возможно, это связано с различием в причинах этих событий. Уже более десяти лет в качестве причины мел-палеогенового вымирания признают столкновение Земли с астероидом, но губительное воздействие этого столкновения быстро ослабело. Случай пермского массового вымирания иной. Многие исследователи считают, что пермское вымирание также было вызвано падением небесного тела, но вот его последствия, обусловившие вымирание, продолжали действовать на протяжении миллионов лет. Некоторые признаки восстановления можно наблюдать не ранее среднего триаса, около 245 млн лет назад.

Подобная ситуация, когда экосистемы восстанавливались очень медленно, могла иметь место, если представить, что пермское массовое вымирание было полностью или частично обусловлено снижением уровня кислорода в атмосфере в конце пермского периода. Новейшие модели изменений кислородных уровней Бернера показывают, что в течение триасового периода содержание кислорода в атмосфере оставалось очень низким, и даже есть доказательства, что уровень кислорода не начал подниматься до самого конца первой половины триаса, что вполне может объяснить такую долгую задержку восстановления биосферы.

Многие исследования подтверждают, что губительные условия, сложившиеся после начала вымирания, продолжали существовать очень долгое время. Если это так и если животные как-то приспосабливались к неблагоприятным условиям, можно предполагать, что в триасе возникли бы многие новые виды, и не только как реакция на освободившиеся экологические ниши, но и как результат воздействия жестких условий самих по себе. Так и произошло: мир наполнили многие новые виды: некоторые из них формой и образом жизни напоминали вымерших животных (реакция на освободившиеся экологические ниши), а некоторые являлись совершенно новыми существами, особенно на суше. Позже мы продемонстрируем, что многие новые виды, возникшие в конце триасового периода, были приспособлены к условиям жизни с низким уровнем атмосферного кислорода, который особо не повышался и в юрском периоде, то есть в течение более 50 млн лет. Триас был временем, в котором сосуществовали существа и из мира, богатого кислородом, и из мира с малым содержанием этого газа в средах.

Столкновение или парниковый эффект?

С конца XX века и до наших дней пермскому массовому вымиранию уделяется все больше внимания в первую очередь потому, что оно было самым опустошительным из всех — новые цифры указывают на исчезновение почти 90 % видов.

Насколько быстро это произошло и что послужило причиной — эти вопросы хорошо освещены палеонтологами из Китая и США в солидных трудах, посвященных ископаемым из отложений известняка возле города Мэйшань в Китае^[166]. Геологи соотносили толщину каждого осадочного слоя с его принадлежностью к определенному виду породы. Затем из каждого слоя, идентифицированного со всей тщательностью, были взяты ископаемые образцы. Не менее тщательно было проведено описание каждого образца с учетом его отношения к определенному слою. Палеонтологи использовали новый статистический метод Чарльза Маршалла, основанный на оценке доверительного интервала^[167], — данная методика позволяет получить данные о реальном временном интервале, к которому может относиться тот или иной ископаемый образец. У китайских исследователей есть некоторое преимущество в работе — в Китае существует большое количество пепловых отложений, возраст которых можно определить с помощью инструментов, измеряющих показатели изотопов урана/свинца. Именно это и было сделано недавно Сэмом Боурингом из Массачусетского технологического института^[168]. Сведения, полученные в результате совместной работы китайских и американских коллег, определяют длительность пермского вымирания не более 60 тысяч лет, что является невероятно точным показателем для пород возрастом более четверти миллиарда лет.

Всего в области Мэйшань было обработано пять различных стратиграфических уровней, образцы брали в интервалах от 30 до 50 см. В результате были найдены и описаны 333 вида морских животных, относящихся к различным группам, например, кораллы, двустворчатые и плеченогие моллюски, улитки, головоногие, трилобиты и многие другие. Таких тщательных исследований в отношении настолько разнообразных образцов фауны из подобных пород до этого никто не проводил.

Помимо прочего, в морских экосистемах — как на мелководье, так и в глубине — в конце пермского периода произошло значительное сокращение содержания кислорода. Об этом пишет, в частности, Юкио Изодзаки из Токийского университета в своей работе 1996 года. В его исследовании показано, что глубоководные кремнистые сланцы, относящиеся к периоду массового вымирания, имеют черный, «траурный», цвет, хотя обычно бывают красного цвета. Дефицит кислорода был, очевидно, так велик, что многие морские организмы погибли быстро и внезапно, подобно тому, как это происходит в современных «красных приливах». Также существуют свидетельства того, что в период пермского массового вымирания происходило глобальное потепление и значительное усиление вулканической активности и эффузии (излияния лавы) в Сибири.

Существует множество гипотез относительно причин данного вымирания.

Во-первых, возможно, сибирские излияния базальта привели к выбросам в атмосферу больших объемов газа, что вызвало изменение климата и кислотные дожди. Это предположение подтверждается специалистом в области геохронологии из Беркли Полом Ренном и его коллегами. Другой возможной причиной различные независимые исследователи считают внезапный выброс метана в атмосферу. Кроме того, хотя непосредственных доказательств этому и не найдено, возможность вымирания вследствие столкновения Земли с астероидом является также очень популярной гипотезой. Например, китайские коллеги

утверждают, что воздействие было «очень быстрым». Среди всех предположений о причинах данного массового вымирания только удар астероида мог привести к таким масштабам и интенсивности гибели животных за очень короткое время.

На рубеже прошлого и нынешнего тысячелетия исследователи истории развития Земли и жизни на планете просто влюбились в теории внеземных причин многих, если не всех, массовых вымираний. В 2000 году пермское вымирание казалось чем-то совершенно отличным от всего, что было известно о вымираниях. В геологическом братстве подозревали, что виной тому стало космическое столкновение, но какое-то не такое, как катастрофа, ставшая сенсацией 1980-х, виновником которой и основной причиной гибели динозавров и всего мел-палеогенового вымирания назвали астероид. Возможно, пермское вымирание имело несколько причин, а возможно, один серьезный толчок спровоцировал возникновение цепи губительных событий. Примечательно, что никто из тех, кто изучал в конце XX — начале XXI века образцы китайских пород, не обнаружил хорошо известные признаки внеземных причин мел-палеогенового вымирания: ни иридия, ни деформации кварца.

Несколько лет подряд начиная с 2001 года команда под руководством геохимика Луанн Беккер^[169] сообщала об открытии больших скоплений сложных молекул углерода (у них смешное название — букминстер-фуллерены, которое, к счастью, сократили до «букиболов»). Исследователи утверждали, что их открытия свидетельствуют в пользу той же причины вымирания в пермский период, что и у мел-палеогенового вымирания — столкновения Земли с астероидом, только в этом случае астероид упал 251 млн лет назад.

Букиболы — большие молекулы, содержащие по крайней мере 60 атомов углерода. Они похожи на футбольный мяч или на геодезический купол, поэтому их и назвали букминстер-фуллеренами — в честь Ричарда Бакминстера Фуллера, который этот купол изобрел.

Гипотеза команды геохимиков такова: букиболы внутри своей структуры удерживают молекулы гелия или аргона, и именно данные новые индикаторы падения астероида были найдены в отложениях времен позднего пермского периода в трех географических областях в разных частях планеты. Беккер и ее коллеги считают, что букиболы в этих местах имеют внеземное происхождение, поскольку благородные газы, обнаруженные в них, показывают необычное соотношение изотопов. Например, земной гелий — это в основном гелий-4 с небольшим содержанием гелия-3, однако внеземной гелий (тот, что зафиксирован командой Беккер в букиболах) является в основном гелием-3. Согласно утверждениям исследователей, этот «звездный багаж» мог быть доставлен на Землю только небесным телом, столкнувшимся с нашей планетой в конце пермского периода, и пермский период на нем и закончился.

Это небесное тело — комета или астероид — было 6–12 км в диаметре, а возможно, таких же размеров, что и астероид мел-палеогенового периода, оставивший огромный кратер Чуксулуб на полуострове Юкатан в Мексике 65 млн лет назад. Однако если пермский космический гость был таких больших размеров, то оставил бы и кратер чудовищных размеров, подобный Чуксулубу, поэтому команда Беккер начала искать кратер, который мог быть спрятан глубоко под другими породами.

Спустя два года, в 2003 году, эти ученые объявили, что нашли гигантский кратер в морском дне у берегов Австралии^[170]. Казалось, столкновение астероида с Землей в качестве причины пермского вымирания подтвердилось. Но затем начались проблемы, причем как с букиболами, так и с вероятностью того, что найденный кратер является следствием столкновения.

Наука предполагает повторяемость и предсказуемость результатов исследований, однако

теория букиболов потерпела поражение по обоим этим показателям (хотя, что любопытно, еще в 2012 году на запрос «пермское вымирание» Google в первую очередь выдавал «букиболы» и «столкновение»). Те, кто работает над раскрытием причин пермского массового вымирания, с самого начала сомневались в верности теории букиболов и столкновения с астероидом.

Первоначально работа Беккер основывалась на образцах, обнаруженных в Китае, Японии и еще нескольких местах. Позднее результаты этой работы не подтвердились сходными исследованиями, а наш приятель Юкио Изодзаки несколькими годами ранее доказал, что изучаемый Беккер и командой слой отложений в Японии недалеко от Осаки на самом деле был сдвинут с пологим смещением — целых три зоны конодонтов по обеим сторонам исследуемого интервала утеряны. Впрочем, они утверждали, что аномальное количество гелия-3 наблюдается именно в том месте, где должна, по их (ошибочному) мнению, находиться граница между слоем, сформированным до вымирания, и слоем, образованным во время вымирания. Что-то было не так. Наконец, наши коллеги из Калифорнийского технологического института выяснили, что гелий-3 покидает букиболы менее чем через один миллион лет, поэтому после 252 млн лет там ничего не могло сохраниться. Кроме того, глубоководная структура, которую принимали за кратер и которая обеспечивала стройность всей теории букиболов, столкновения и гелия-3, в действительности оказалась вулканического происхождения и никакого отношения к космосу не имела.

К изучению морских отложений позднего пермского периода и раннего триаса подключилась еще одна команда исследователей — геологов и специалистов в области органической химии. Они рассматривали не сами по себе окаменелости тел животных, а извлекали из пород останки в поисках определенных химических ископаемых биомаркеров^[171]. Такие биомаркеры могли появиться только в результате фотосинтезирующей деятельности пурпурных бактерий, обитавших исключительно на мелководье, причем без кислорода, но насыщенном ядовитым сероводородом. По-видимому, океаны были населены огромными биомассами микроорганизмов, производящих сероводород. Это были не отдельные выбросы газа, как в современном Черном море — вероятно, постоянные выделения сероводорода в воду наблюдались почти во всех морях или даже во всем Мировом океане, о чем позволяют судить недавние исследования ученых из Массачусетского технологического института, которые в 2009 году обнаружили этот же биомаркер пермского периода более чем в десятке мест по всему миру^[172]. Возможное объяснение тайны самого крупного массового вымирания в истории удалось найти геохимикам из Университета штата Пенсильвания в 2005 году. Группу коллег возглавляли Ли Камп (один из крупнейших специалистов в области химии океана и особенно — углеродного круговорота) и Майк Артур. В их статье говорится, что сероводород, производимый в океанах микроорганизмами (точнее, различными видами пурпурных бактерий), стал в конце пермского периода непосредственной причиной вымирания как на море, так и на суше^[173].

Гипотеза Кампа и начало теории парникового вымирания

Ли Камп и его коллеги предположили, что в периоды большого дефицита кислорода в океанах (времена, когда у дна океана, а возможно и у поверхности, уровень содержания кислорода сильно снизился) концентрация сероводорода на глубине резко увеличилась и превысила некий критический барьер. Далее, в океанах могли возникнуть условия (напоминающие, например, современное состояние Черного моря), когда произошло быстрое поднятие глубинных водных слоев, насыщенных сероводородом, к поверхности. Результат был ужасен: на поверхности воды образовывались большие пузыри сероводорода, они лопались, и токсичный газ устремлялся в атмосферу. Такой новый подход к объяснению глобальных биологических катастроф показывает связь между морскими и сухопутными массовыми вымираниями, поскольку сероводород накапливается в тропосфере до концентраций, смертельных для растений и животных, даже если испарения этого газа из океана относительно невелики. Эта теория может объяснить события не только позднего пермского периода, но также демонстрирует, что могло происходить в другие периоды истории Земли, и возможно, таковы и были основные глобальные изменения в средах обитания, приводившие к массовым вымираниям^[174].

Коллеги Кампа сделали некоторые предварительные вычисления и были поражены, обнаружив, что объемы сероводорода, присутствующие в атмосфере позднего пермского периода, почти в две тысячи раз превышали современный объем выбросов этого газа (в основном за счет вулканов) — более чем достаточно, чтобы содержание сероводорода в атмосфере достигло смертельного уровня.

Еще кое-что: озоновый слой, оберегающий все живое от опасных ультрафиолетовых лучей, также, вероятно, пострадал. То, что в конце перми это действительно произошло, можно доказать, например, наличием мутаций в ископаемых того периода, найденных в Гренландии, — такие изменения могли произойти лишь в результате сильного воздействия на организмы ультрафиолета, а значит, существовали явные нарушения озонового слоя.

Сегодня мы наблюдаем озоновую дыру над Антарктидой, под которой быстро уменьшается количество фитопланктона. Если таким образом одно из звеньев пищевой цепи будет уничтожено, то вскоре пострадают и животные более высокого уровня. Полное уничтожение озонового слоя могло произойти и в результате бомбардировки Земли частицами от близкой к нашей планете сверхновой звезды, и это тоже привело бы к массовому вымиранию.

Наконец резкое увеличение объемов метана в атмосфере резко усилило бы парниковый эффект из-за возрастания концентрации углекислоты и самого метана. Сероводород улетучивается в атмосферу и разрушает озоновый слой, одновременно парниковые газы повышают температуру на планете — убийственность сероводорода возрастает вместе с температурой. Массовые вымирания, таким образом, могли возникать как реакция на последствия губельных, хотя и кратковременных событий в окружающей среде.

До этого момента мы рассматривали лишь те данные, которые получили, исследуя различные породы. Но давайте вспомним теперь и о другом способе получения информации о прошлом — о моделях атмосферы прошлых периодов. Существует несколько типов таких моделей, и многие вполне годятся для прогноза состояния атмосферы в будущем.

Для пермского периода такая модель создана, она показывает концентрации атмосферного кислорода, углекислого газа, а также возможные мировые температуры. Впервые изменения уровня атмосферного кислорода и углекислоты были установлены

коллегой из Йельского университета Робертом Бернером. Он и его сотрудники обнаружили, что в конце перми должны были одновременно произойти резкое увеличение уровня углекислого газа и падение уровня кислорода. Затем Ли Камп и его исследовательская группа проделали длительную и сложную работу, чтобы установить возможное распределение выбросов сероводорода на планете. Для этого они использовали модель общей циркуляции (МОЦ). Такие модели первоначально создавались для изучения условий современной погоды и климата. Но поскольку нам известно местоположение континентов для определенного момента в конце пермского периода и триаса, а также температуры и уровни кислорода и углекислого газа в атмосфере и океане, то эти модели можно применить и к условиям пермского периода.

Камп рассудил, что ключевым элементом должен быть фосфор. Это ключевой питательный компонент, и если окажется, что уровень фосфора в океане в конце пермского периода увеличился, то объем сероводорода также можно вычислить, исходя из концентраций тех, кто фосфор потребляет, — серных микроорганизмов.

Выброс сероводорода произошел не один раз, это была последовательность выбросов, совпадающих по времени с границами пород перми и триаса по всему миру. Выводы Кампа довольно мрачны: модель показывает не только места выбросов сероводорода в океан и воздух, но также полностью подтверждает рассчитанные им в 2005 году объемы сероводорода, выброшенного в атмосферу: концентрация данного газа была так высока, что погибла почти вся сухопутная жизнь, уровень сероводорода в морской воде привел к гибели многих организмов, обитавших в верхних слоях океанов, особенно тех существ, которые создают известковые образования: кораллов, двустворчатых моллюсков, плеченогих, мшанок — все они стали жертвами крупнейшего вымирания.

После публикаций работ Кампа и его коллег многие другие исследователи, например, Том Альджо из Университета Цинциннати, дополнили информацию о химических аспектах пермского массового вымирания^[175].

Влияние высоты обитания на развитие и распространение видов

Исследования массовых вымираний не являются новым направлением в науке. На самом деле это было первое направление, с которого вообще началась геология как наука в первые годы XIX века. Современная новизна исследований заключается лишь в том, что мы рассматриваем влияние микроорганизмов на самое крупное массовое вымирание — пермское, а возможно, их влияние на все пять крупнейших вымираний в фанерозе.

Вопрос же о последствиях массовых вымираний, напротив, является относительно новой научной проблемой, причем одной из основных для эволюционной биологии и палеобиологии. Мы уже знаем, что чем масштабнее вымирание, тем сильнее отличие жизни после него от жизни до него. И речь идет не только о периоде, непосредственно следующем за событием вымирания, — первые несколько тысяч или миллионов лет. Иной раз возникают новые эволюционные направления, генетические ветви, развитие которых занимает потом десятки миллионов лет, и порой эти изобретения эволюции остаются на планете навсегда.

Изменения уровня кислорода лишь недавно признали как важный фактор миграции видов и межпопуляционной гибридизации. Горные цепи зачастую являются барьерами для обмена генами, а это приводит к образованию различных биосистем по разные стороны горного массива. В конце пермского периода обитателям областей непосредственно на уровне моря приходилось дышать так, как если бы сегодня они находились на уровне пяти тысяч метров над уровнем моря (выше, чем гора Реньер в Каскадных горах в штате Вашингтон). Таким образом, даже небольшие высоты в пермский период усиливали «высокогорный» эффект: скромные по высоте холмы являлись областью, неподходящей для обитания животных. В результате животный мир оказался разграничен на множество областей у морских побережий, где обитали эндемичные организмы.

Высокие плато на континентах, возможно, были вовсе необитаемы, исключение составляли самые стойкие к большим высотам животные. Но эта гипотеза противоречит ожидаемому поведению континентов: 250 млн лет назад континенты были объединены в один гигантский суперконтинент Пангея, и Атлантический океан не должен был мешать свободному перемещению наземных животных с одного края континента на другой. Однако существовал другой барьер — большая высота, которая серьезно препятствовала миграции, и новейшие исследования позвоночных того периода доказывают, что свободного перемещения групп организмов тогда не было, но существовали отдельные экосистемы, по крайней мере на суше.

Работы, проведенные в конце XX и начале XXI века многими исследователями — Роджером Смитом, Дженнифер Бота, Питером Уордом (соавтором данного труда) в пустыне Карру, Майком Бентоном в России, Кристианом Сайдором в Нигере^[176], — доказывают существование таких, не связанных друг с другом, экосистем, например, в Африке. Данные биологические сообщества являлись весьма специфичными и не походили друг на друга по видовому составу. Получается, что в период низкого уровня кислорода высота над уровнем моря создавала дополнительное препятствие для миграций и потока генов^[177]. Совсем по-другому обстояли дела в периоды с высоким уровнем кислорода: фауна не была привязана к отдельным областям, и изолированные сообщества организмов были немногочисленны.

Дефицит кислорода привел не только к ослаблению миграции, но и к тому, что многие области, находившиеся в поздний пермский период и в триасовый период на высоте более тысячи метров над уровнем моря, оказались необитаемы. Этот эффект — влияние высоты на

распространение организмов по суше — мог в значительной степени определять жизнь животных в условиях низкого содержания кислорода в атмосфере. Сокращение мест обитания из-за невозможности заселения высотных областей привело к тому, что многие животные либо мигрировали к морям, либо вымерли. Усилилась борьба за территорию и ресурсы, в прибрежных регионах появились новые хищники, паразиты и болезни, что в свою очередь привело к вымиранию некоторых видов и там. Мы подсчитали, что к концу перми более 50 % земной суши из-за своих высотных характеристик оказалось непригодным для обитания. Возможно, вымирание произошло по причинам, давно изложенным в книге Макартура и Уилсона *The Theory of Island Biogeography* («Теория биогеографии островов»): разнообразие видов имеет отношение к территории обитания, и если остров или какая-нибудь ограниченная территория становится меньше, животные начинают погибать. Влияние высоты на развитие и распространение жизни подтверждает это научное положение.

Еще один аспект пермского массового вымирания

Питер Уорд, один из авторов данного труда, изучал еще один аспект пермского массового вымирания. Результаты его исследований пока не опубликованы, и мы с удовольствием приводим их здесь, тем более что они имеют непосредственное отношение к предмету обсуждения. Фредерик Дули, аспирант Уорда, совместно с Ли Кампом пришел к удивительному выводу. Но сначала небольшое пояснение: Дули занимается вопросом воздействия сероводорода на растения и некоторых животных, а Камп разрабатывает модели состояния океана в конце пермского периода, и ему необходимо делать расчеты объемов сероводорода в верхних слоях Мирового океана. Результаты вычислений Кампа аспирант Дули использовал в экспериментах с одноклеточным океаническим планктоном, включая самый важный вид океанического зоопланктона — похожих на креветок веслоногих ракообразных-копеподов. Уровень сероводорода в эксперименте был недостаточным, чтобы убить водоросли, — наоборот, к удивлению экспериментатора, водоросли стали расти быстрее. Напротив, веслоногие погибли почти мгновенно. Без веслоногих, поедающих фитопланктон и таким образом контролирующих его размножение, эти крошечные растения погружаются на морское дно и там загнивают, уничтожая и без того небольшой запас кислорода в нижних слоях воды. Это приводит к резкому скачку содержания углекислого газа, а также убивает все виды морских животных в верхних слоях океана. В результате планета задыхается среди гниющих растений и остается почти совсем без животных — в конце пермского периода, по крайней мере в океане, так и произошло. Ситуация на суше напоминала две мировые войны одновременно Роджер Смит обнаружил весьма убедительные доказательства необычайной засухливости и неожиданной жары в Южной Африке 252 млн лет назад. Наши собственные изыскания в пустыне Карру (результаты опубликованы в 2005 году) позволяют подробно описать вымирание сухопутных животных в тот же временной период [\[178\]](#). Роджер Смит считает, что только засухи и жары уже было вполне достаточно, чтобы вымерло большинство позвоночных. Нам же больше нравится аналогия с мировыми войнами: огромные армии погибают в пустыне и, как во времена Первой мировой, задыхаются под действием отравляющего газа. Только в древности это был не хлор, а ядовитый сероводород в атмосфере и океане.

Глава 13

Триасовый взрыв:

252–200 миллионов лет назад

Одним из самых приятных ощущений от общения в научной среде — будь то в маленьком провинциальном колледже или в одном из крупнейших исследовательских центров мира — является наслаждение чувством коллегиальной солидарности. В Америке это обусловлено еще и самим устройством университетской системы, которая предполагает сперва 6–7 лет работы по временному контракту и только затем постоянную должность. Постоянство! Возможно, из всех профессиональных коллективов университетские факультеты — самые стабильные, и, в сравнении с другими коллективами, в университетах наблюдается относительно небольшая текучесть кадров. В результате складываются коллегиальные дружеские отношения, зачастую весьма продолжительные. В этом плане университеты очень похожи на своих предшественников — семинарии, куда монахи приходили еще молодыми людьми и где проводили всю свою жизнь в среде себе подобных. И так же, как в старинных аббатствах, более молодые коллеги приучались уважать тех, кто был старше и *мудрее*, и прислушиваться к ним.

Авторам данного труда в 2000-е годы или около того посчастливилось присутствовать на встрече с несколькими старшими коллегами естественнонаучного факультета в Калифорнийском технологическом институте. В числе старших товарищей был знаменитый Сэмюэль Эпстайн — один из наиболее выдающихся ученых в области геохимии. Сэм Эпстайн работал в Университете Чикаго как раз в тот момент, когда нобелевский лауреат Гарольд Юри открыл способ измерения температуры формирования древних карбонатных пород с использованием метода сопоставления изотопов кислорода, обнаруженных в карбонатных отложениях. Соотношение кислорода-16 варьировалось вместе с гораздо более редким кислородом-17 пропорционально температуре формирования пород.

Спустя некоторое время Сэм Эпстайн поступил на работу в Калифорнийский технологический институт и занимался высокоточными измерениями множества образцов, применяя самые разнообразные методы. Однако его первой любовью все же было исследование температур в древности. После замечательной встречи, о которой мы упоминали выше, он пригласил нас, Киршвинка и Уорда, в свою лабораторию, на тот момент уже частично демонтированную. Геохимическое оборудование 1950–1960-х годов (золотые дни Сэма) состояло в основном из самодельных колбочек, стеллажей с тонкими пробирками и трубками, которые, извиваясь спиралями и пересекаясь, образовывали замысловатую стеклянную паутину. В некоторых узлах этой «паутины» находились странные сосуды, вокруг которых вились резиновые трубки, оканчивающиеся краниками замысловатого вида. И все было сделано кустарями от науки, которые в середине XX века двигали исследования только вперед. Они были искусными технарями, целой эпохой, ушедшей по причине экономии бюджета и появления новых исследовательских технологий.

Сэм бродил по лаборатории, а разговор тем временем зашел о наших непосредственных научных интересах: пермском массовом вымирании и его возможных причинах. В то время теория столкновения с астероидом рассматривалась как одна из наиболее вероятных. Сэм, однако, эту точку зрения не разделял. Он повернулся к нам и с улыбкой рассказал следующую историю. Однажды он исследовал образцы морского известняка, относящиеся к самым нижним ярусам триаса и, вероятно, сформированные на очень мелководном участке моря в

том месте, где находился экватор, а ныне Иран. В порыве внезапного вдохновения, а может, потому, что он больше всего любил именно этот аспект анализа, он решил проанализировать, при каких температурах могли сформироваться такие образцы породы. Сэм рассказал нам, что был поражен, когда понял, что все образцы были образованы при температуре выше 40 °С, а некоторые — при температуре даже выше 50 °С! Образцы были взяты от древних кораллов, существ, очень чувствительных к солености воды.

Подобные температуры могут наблюдаться в стоячих водоемах или в лагунах. Но в таких местах не обитают плеченогие! Температурные показатели, полученные Сэмом Эпстайном, не могли существовать нигде на Земле, поскольку подобное температурное состояние воды в океане нереально!

Восьмидесятилетний Сэм грустно улыбался. Он признался нам, что у него так и не хватило духу опубликовать эти данные. Всякий палеотемпературный анализ требует для чистоты эксперимента, чтобы образцы были «чистыми», тогда как породы частенько подвергаются воздействию подземных вод, химических процессов, последующему нагреванию или охлаждению и в результате «выдают» показатели того, что они якобы сформировались при аномально высоких температурах. И чем старше порода, тем сложнее получить точные данные при температурном анализе. Тем не менее Сэм был совершенно уверен, что он прав и что в первый миллион лет после пермского вымирания, то есть в первый миллион лет триасового периода, температура воды в океане была выше 37 °С.

Несколько лет спустя, проводя палеотемпературный анализ другого образца триасового периода, мы получили показатель температуры около 40 °С. На этот раз глубина залегания была даже ниже, чем у древних образцов, которые описывал Сэм Эпстайн. Но, как и он, мы не опубликовали свои данные.

Кто не рискует, тот не выигрывает. В 2012 году совместная группа китайских и американских ученых^[179], пытаясь раскрыть секрет долгого восстановительного периода морской фауны после пермского массового вымирания, сделала открытие и опубликовала результаты: температура океана — 40 °С, на суше — все обжигающие 60 °С! В отличие от работ Эпстайна, данное исследование использовало более 15 000 образцов, что позволило провести очень детальный и трудоемкий анализ условий окружающей среды в период после пермского массового вымирания.

Ученые, получившие эти данные, попытались представить себе, каков был этот древний жаркий мир. Большинство морских организмов погибают при температуре воды выше 40 °С, а именно такой показатель был обнаружен. При такой температуре и выше практически прекращается фотосинтез. В таком мире зона тропиков должна быть необитаема, и жизнь главным образом сосредоточена на высоких широтах. Даже в средних широтах обитали очень немногие сухопутные животные. При такой жаре воздух был насыщен водяными парами, а тропики оставались влажными круглый год. Судя по всему, это была влажная, но пустыня — не было никакой растительности.

Более точная современная геохронология показывает, что период высоких температур продолжался по крайней мере первые три миллиона лет триаса. Возможно, температуры доходили и до более высоких показателей, и максимум пришелся на период около 247 млн лет назад, когда температура оказалась самой высокой за всю историю существования животных. Сэм Эпстайн был прав. И мы были правы^[180]. Ошиблись мы только в одном — не надо было отказываться от публикации результатов своих работ.

Пермское вымирание явилось для растений и животных одной из самых ужасных катастроф в истории развития жизни на нашей планете. А вот с точки зрения микроорганизмов, особенно любителей серы, это событие оказалось чем-то вроде

возвращения в рай. С наших же позиций пермское вымирание представляется приблизительным повторением произошедшего в конце девонского периода, то есть первого из так называемых парниковых массовых вымираний. Еще многому суждено было свершиться: и в конце триаса, и в юрский, и в меловой периоды, а последнее парниковое вымирание произошло вообще в конце палеоцена, всего 60 млн лет назад, но с пермским массовым вымиранием не сравнится ни одно из событий подобного рода, в том числе и по масштабам разнообразия форм жизни, которые появились после.

Пермское массовое вымирание открыло дорогу в мир многим новым существам, но для нас особенно интересны два совершенно новых на тот момент истории эволюционных направления — млекопитающие и динозавры, которые к концу триаса процветали и развивались. Это были чрезвычайно важные эволюционные линии развития жизни (редко какая эволюционная новинка дает название целым геологическим интервалам, как в случае с эрой динозавров), но появились они относительно поздно и в триасовый период оставались маленькими по размерам (особенно млекопитающие, которые редко были крупнее крысы), а также являлись малыми группами как по разнообразию видов, так и по численности. Эра динозавров началась не ранее юрского периода, а млекопитающим пришлось ждать своей эры до самого кайнозоя.

Задолго до появления динозавров и млекопитающих на эволюционной сцене выступали другие животные и растения триасового периода. Это были как уже существующие, но развившие новые черты в процессе эволюции таксономические группы, так и совершенно до того невиданные существа, обладающие новыми формами, кардинально отличными от форм палеозойской эры. Именно это смешение старого и нового сделало триас перекрестком эпох. В некотором отношении данный период можно сравнить с кембрием — множество новых морфологических типов наводнили экологические ниши, опустошенные недавним вымиранием (в тот раз это были представители вендобионты). И как во времена кембрийского взрыва, многие новинки эволюции оказались весьма недолговечными и погибли, не выдержав испытаний естественного отбора. Столь интенсивного появления новых форм, как в кембрии и триасе, больше ни в один из периодов не происходило. Тому, как кажется, есть две причины. Во-первых, пермское вымирание настолько опустошило различные среды обитания, что почти любой тип организмов мог иметь шанс выжить и развиваться, по крайней мере, некоторое время. Однако существует и вторая причина, которая может оказаться более значимой для всего, что происходило в триасовый период.

Едва оправившись от потерь пермского массового вымирания, раннетриасовый мир оказался почти необитаем. Кроме того, все исследовательские модели говорят о том, что уровень кислорода в тот период был значительно ниже современного. В предыдущих главах мы продемонстрировали, что низкие уровни кислорода, особенно во времена, следующие за массовыми вымираниями, стимулируют развитие новых строений тел. Два этих фактора — малая заселенность сред обитания и низкий уровень кислорода — в совокупности представляли собой благоприятные условия для бурного развития новых морфологических типов, то есть возникла ситуация, подобная обстоятельствам кембрийского взрыва. На этом основании мы полагаем, что вполне правомерно видеть сходство кембрия и триаса, и поэтому называем события соответствующего периода триасовым взрывом.

Триасовый период был временем развития широчайшего разнообразия в воде и на суше. В океане, например, место вымерших плеченогих заняли многие новые группы двусторчатых моллюсков, а различные аммоноидеи и наутилоиды наполнили моря новыми видами хищников. Четверть всех когда-либо существовавших аммонитов обнаружена именно в отложениях триасового периода — интервал, составляющий 10 % всего периода

существования на Земле этих организмов. Океаны наполнились аммонитами, своей формой полностью не похожими на своих палеозойских предков, — почему бы нет, если эти существа показывали исключительную для беспозвоночных степень приспособленности к условиям дефицита кислорода. В то же время появились каменистые кораллы — новый отряд — и начали строить свои рифы^[181]. Многие сухопутные пресмыкающиеся вернулись обратно в море. При этом именно на суше произошли самые замечательные изменения и эволюционные эксперименты в морфологии организмов. Никогда до и после мир не видал таких разнообразных анатомических вариантов на суше, как в тот период. Некоторые существовали еще в перми — терапсиды. Они пережили пермское вымирание, снова стали развиваться в начале триаса и теперь соперничали с архозаврами за господство на суше, впрочем совсем недолго. Конкуренцию терапсидам составляли многие рептилии. От звероподобных рептилий до ящериц, от самых ранних млекопитающих до настоящих млекопитающих — триас был настоящей экспериментальной лабораторией эволюции.

На первый взгляд, млекопитающие неизбежно должны были обогнать рептилий в эволюционной гонке. В конце концов, к тому моменту многие звероподобные рептилии уже были теплокровными, вероятно, способными (как сегодня) более эффективно, чем яйцекладущие динозавры, заботиться о потомстве; зубы млекопитающих (благодаря которым они потом все же стали господствующей группой организмов) приспособились к любой пище — семенам, траве, мясу. Но они все-таки проиграли в первом раунде. Первая эра млекопитающих закончилась их вымиранием, но на смену ей пришла вторая эра — с совершенно иными формами животных.

Сегодня работа палеонтологов во многом стала легче благодаря компьютерам. Новые революционные возможности в обмене информацией, морфологической характеристике, анализе изображений и в поиске источников позволяют значительно расширить исследование. Теперь доступны огромные базы данных, не нужно больше ходить по музеям, собирая данные, или глядеть в микроскоп, измеряя образцы чуть ли не вручную, — почти все новые данные, помогающие нам создать новую историю развития жизни на Земле, поступают от больших групп исследователей, которые вводят все новые сведения в машинные системы. Компьютеры делают для нас огромную работу, а мы получаем возможность по-новому взглянуть на изучаемый предмет.

Давайте взглянем на недавние результаты работы наших коллег из Мюнхенского университета, которые исследовали размеры позвоночных животных триаса, обитавших на суше.

В ходе работы этой исследовательской группы было обнаружено, что в раннем триасе на обедневшей после пермского вымирания планете возникли всего лишь два основных морфологических типа: с четырьмя лапами (четвероногие) и с двумя (двуногие). С течением времени (триас длился около 50 млн лет), и уже в юрском периоде (также длился 50 млн лет) эволюция ящерообразных породила гораздо большее разнообразие видов и структурных типов (в том числе в размерах), чем у звероподобных рептилий. Пока другие палеонтологи тратили время, осматривая музейные коллекции, мюнхенские коллеги получили готовые цифры, обосновавшие гипотетические сведения.

Данное исследование также подтвердило, что ящерообразные быстрее росли, достигая половозрелости и больших размеров значительно быстрее животных других групп. Эта черта — скорая готовность к размножению — пожалуй, самая важная из всех. Быстрое созревание и рост означают, что ящерообразные приспособились к экологическим ролям больших травоядных и крупных хищников намного быстрее, чем более мелкие, медленно растущие терапсиды, поэтому последние «опоздали к раздаче» соответствующих анатомических форм

и экологических ниш.

Впрочем, остаются кое-какие нерешенные вопросы. В течение позднего триаса, когда динозавры уже вполне освоились в природе, они почему-то не выросли до гигантских размеров, характерных для последующего — юрского — периода, и не стали господствующей по численности группой существ. Как утверждает палеонтолог из Чикаго Пол Серено, в течение почти 20 млн лет, со времени своего появления около 221 млн лет назад и до конца триаса, около 201 млн лет назад, динозавры и терапсиды были одинаково немногочисленны и малорослы^[182]. Возможно, в тот период динозавров было больше, чем терапсид, но общая картина показывает, что обе группы не были доминирующими в экосистемах. Нам представляется, что в те времена вообще никакие организмы особо не процветали, а для четвероногих существ куда больше преимуществ имело возвращение в моря, что и происходило в триасовый период в больших масштабах.

Традиционно принято считать, что интенсивный рост многообразия видов в триасе связан с опустошительным пермским вымиранием, которое освободило многие экологические ниши для новых организмов. Возможно, впрочем, более простое объяснение: к тому времени многие морфологические типы сухопутных животных достигли такого этапа эволюции, когда строение их тел стало, наконец, наиболее функционально эффективным. Уже в конце пермского периода и в течение триаса развитые группы животных, например, звероподобные рептилии (точнее, группы дицинодонтов и цинодонтов), продолжали осваивать новые способы постановки тела в пространстве по сравнению с более примитивными сухопутными рептилиями, лапы которых находились по бокам тела.

Структурные характеристики тел развивались в таком направлении эволюции, когда наиболее успешными становились морфологические типы, способные питаться, размножаться и бороться за выживание в условиях малого содержания кислорода в окружающей среде. Есть старинная поговорка: ничто так не обостряет вкус жизни, как перспектива близкой смерти. То же верно и для эволюции: жизнедеятельность животных требует много кислорода, и в пермский период добыть его было легче легкого, но позднее пришлось приспособливаться к самому жесткому из всех жестких условий естественного отбора — недостатку кислорода. Снижение объема кислорода в атмосфере на две трети от прежнего уровня запустило механизм эволюционных инноваций, который в полную силу заработал в триасе. Таким образом, разнообразие морфологических типов животных в триасовый период схоже с разнообразием морских обитателей в период кембрийского взрыва. Кембрийский взрыв следовал за массовым вымиранием (эдиакарская фауна), и то было время более низкого уровня кислорода по сравнению с сегодняшним. А низкий уровень кислорода всегда стимулирует эволюцию новых форм.

Триас — общая картина

Научно обоснованные временные рамки раннего триасового периода — 250–245 млн лет назад, и в этом интервале восстановления после массового вымирания почти не происходило. Любопытна история изменений уровней кислорода в тот период. Содержание кислорода в атмосфере снизилось почти до минимальных отметок в 10–15 % и оставалось таким на протяжении 5 млн лет, то есть 245–240 млн лет назад. Также существуют интересные данные о больших изменениях в соотношении изотопов углерода в тот период, указывающие, что весь углеродный цикл испытал некоторые возмущения, а это отражает либо последовательность выбросов метана в атмосферу и океан, либо говорит о том, что в тот временной интервал произошел ряд малых вымираний. И вновь мы сталкиваемся с удивительным сходством этого периода и кембрия.

Вся картина исследований показывает, что мир был неласков к животным. Возможно, микроорганизмы и процветали, особенно те, чей жизненный цикл связан с серой, но животные переживали по-настоящему трудные времена. Однако трудные времена всегда являются двигателем эволюционного прогресса и инноваций, и тот длительный период нехватки кислорода стал настоящим прорывом в области новых дыхательных систем. На суше развивались две новые группы: млекопитающие и динозавры. Первые ждали лучших времен, вторые быстро стали господствующей формой жизни на планете.

В предыдущей главе уже говорилось, что пермское вымирание почти уничтожило сухопутных обитателей. Сильно пострадали терапсиды. Об архозавроморфах (рептилии, похожие на крокодилов) того периода известно очень мало, в формациях Карру или в России в основном находятся окаменелости дицинодонтов (звероподобных рептилий). Впрочем, в пустыне Карру авторами этой книги были обнаружены, хотя и совсем немного, хорошо сохранившиеся окаменелости архозавроморфов в верхних слоях пермского периода.

Хотя мы и недостаточно осведомлены о пермских предках архозавроморфов, нет никаких пробелов в наших знаниях о том, как они развивались в триасовом периоде. В формации Карру, буквально несколькими метрами выше условной границы перми и триаса, достаточно регулярно обнаруживаются останки относительно крупной рептилии протерозуха (хасматозавр). Это было определено сухопутное существо с впечатляющим количеством очень острых зубов, наверняка хищник. Его лапы, как у крокодила, располагались по бокам тела, хотя, впрочем, немного под телом, что позволяло ему находиться в более приподнятом над землей положении. В течение триасового периода положение тел архозавроморфов над землей становилось все более приподнятым, эти анатомические изменения происходили с ними очень быстро, и вскоре появились хищники, которые могли передвигаться с большей скоростью, чем протерозух.

Кроме очевидной необходимости в более быстром передвижении, новшества в положении лап относительно тела также решали важный вопрос одновременности движения и дыхания. Как и современные ящерицы, протерозух двигался, вероятно, изгибая туловище, что приводило к сжатию отдела легких в груди, и дыхание при передвижении затруднялось, особенно во время бега. Ящерицы и саламандры не дышат при передвижении, и протерозух также не избежал похожих проблем, хотя, вероятно, в меньшей степени^[183].

Решение этой проблемы — переместить конечности под туловище, но это еще не всё^[184]. Чтобы по-настоящему избавиться от затруднений с дыханием, помимо структуры тела необходимо значительно перестроить и саму систему дыхания. Организмы той ветви эволюции, от которой произошли птицы и динозавры, развили эффективное качество —

двуногость. Лишившись одной пары опорных конечностей, они получили возможность дышать и передвигаться одновременно. Предки млекопитающих также приобрели несколько новшеств, в том числе вторичное нёбо (позволяет одновременно дышать и поглощать пищу), а также полностью поднятое над землей туловище, хотя они по-прежнему оставались четвероногими. Но все же и этих новоприобретений оказалось недостаточно, требовалась новая дыхательная система. И появилась диафрагма — система мускулов, позволяющая намного интенсивнее вдыхать и выдыхать воздух.

Помимо изучения костей динозавров, существует много других способов узнать о развитии жизни на планете. Триасовый взрыв также связан с развитием разнообразия пресмыкающихся, вернувшихся к водному образу жизни, — так они отреагировали на усиление жары и снижение уровня кислорода в данный период.

Кислород необходим животным, чтобы регулировать обмен веществ, этот газ участвует в реакциях, которые составляют саму суть жизни. Однако в любом химическом процессе присутствует не один, а множество факторов, регулирующих реакции. Одним из самых важных факторов является температура. Обмен веществ, метаболизм — процесс, при котором организм поглощает энергию, и интенсивность именно этого процесса весьма различна для теплокровных и холоднокровных животных. Впрочем, даже в одном организме интенсивность обмена веществ в удивительно высокой степени и напрямую зависит от температуры. Недавние исследования показывают, что около одной трети, а иногда и половина всех энергетических ресурсов организма животного тратится на то, чтобы просто остаться в живых в ходе таких процессов, как белковый обмен, циркуляция крови, дыхание. Другие действия, более необходимые в тот или иной момент, — передвижение, размножение, принятие пищи и прочее — накладываются на упомянутые внутренние процессы, и скорость поглощения «горючего», а с ним и температура, возрастает^[185]. Однако с ростом интенсивности метаболизма увеличивается и потребность в кислороде, поскольку химические реакции, составляющие суть жизни, зависят от этого вещества. Ключом к проблеме является то, что интенсивность обменных процессов удваивается или утраивается с повышением температуры на каждые десять градусов. Последствия этого в мире, где мало (по сравнению с современностью) кислорода, но более высокие средние температуры, огромны.

Между уровнями атмосферного кислорода и температурой прямой зависимости нет. Зато она существует между температурой и углекислым газом. В главе 3 было указано, что уровни кислорода и углекислоты в атмосфере, грубо говоря, находятся в обратном отношении друг к другу: много кислорода — мало углекислого газа, и наоборот. Многие периоды в истории Земли демонстрируют эту обратную зависимость, и во времена с низким уровнем атмосферного кислорода уровень CO_2 был высок, а значит, было и жарко. В мире, где очень жарко и мало кислорода, животным приходится нелегко. Мы уже рассказали о некоторых способах адаптации к условиям с низким уровнем кислорода. Один из них, самый очевидный, — искать пути охлаждения, иногда этого можно добиться физиологическими методами, а иногда — поведенческими.

Существует, например, способ, одновременно и морфологический, и физиологический, и поведенческий — возвращение в океан, прохладный океан. Даже в самые жаркие периоды истории океан оставался заметно прохладнее, поэтому, возможно, многие сухопутные животные мезозойской эры сменили лапы на ласты или плавники и сбежали в моря, причем в значительных количествах.

В данной главе уже упоминалось, что в описываемый период высоких температур и низкого уровня кислорода неуклонно возрастало число четвероногих, которые вернулись в

морскую среду обитания. Ни до, ни после данного периода не было таких случаев, когда столько таксономических групп оставили бы сушу ради моря. Сегодня мы радуемся большому количеству видов китов, тюленей, пингвинов, а ведь эти три группы эволюционировали из сухопутных существ и теперь демонстрируют высокую степень приспособленности к морской среде. Впрочем, киты и тюлени вместе взятые составляют всего 2 % всех млекопитающих, а пингины — 1 % птиц. Однако в триасовых морях водилось множество других «репатриантов» — животных, которые были сухопутными, но потом заново приспособились к жизни в воде. В триасе существовали гигантские ихтиозавры, четвероногие плакодонты (они очень походили на современных тюленей, только у них имелись плоские коренные зубы, явно приспособленные для перемалывания раковин и панцирей). В юрском периоде к ихтиозаврам присоединилась целая компания плезиозавров с короткой или длинной шеей. В меловом периоде ихтиозавры исчезли, а на смену им пришли крупные мозазавры. И всех этих существ объединяло одно — когда-то они были сухопутными.

Такое большое количество морских четвероногих подтверждается исследованием специалиста по морским обитателям Натали Бардет, которая в 1994 году опубликовала обзорную статью^[186] обо всех известных тогда семействах морских рептилий мезозойской эры. Примечательно, что очень многие из них относятся к триасу. Так почему же столько животных вернулось в океан?

Низкий уровень кислорода и высокая температура были двумя основными доминантами в окружающей среде на планете тех времен. Специалист по рептилиям из Вашингтонского университета Рей Хьюи предположил, что именно жаркий климат триаса и юры был тем фактором, который спровоцировал эволюционный переход некоторых пресмыкающихся с суши обратно в океан. В 2006 году Питер Уорд (один из авторов данной книги) доказал, что между уровнями кислорода в мезозое и количеством рептилий существовала интересная обратная зависимость: периоды низкого уровня кислорода соответствовали времени появления большого количества морских рептилий. Рост уровня кислорода, наоборот, совпал с заметным сокращением числа семейств тех четвероногих, которые вели исключительно морской образ жизни. Впрочем, связи между абсолютным количеством морских обитателей и сухопутных динозавров не прослеживается, и упомянутая обратная зависимость между уровнем кислорода и числом животных остается просто интересным новым аспектом, в котором мы рассматриваем планету мезозойской эры.

Триасово-юрское вымирание

Определение уровня кислорода в окружающей среде триасового периода является довольно новым открытием. Еще несколько лет назад минимальные показатели содержания кислорода на планете за последние 300 млн лет приписывались границе перми и триаса — 252 млн лет назад. Однако теперь исследователи склонны смещать эти данные в сторону границы между триасом и юрой — 200 млн лет назад. Таким образом, триас не был временем роста уровня кислорода, а, наоборот, в позднем триасе уровень кислорода был вдвое ниже современного — около 10 %. Времена позднего триаса совпадают с периодом значительного сокращения численности большинства сухопутных позвоночных, если не считать первых динозавров.

Причины этого массового вымирания, как и любого другого, по-прежнему точно не известны. Всем очевидно, что триасово-юрское вымирание, как и пермское, было очень быстрым и сопровождалось ужасной жарой, а также в это время произошло мощнейшее излияние базальта, по масштабам уступающее только сибирским траппам позднего пермского периода. Два массовых вымирания подряд с интервалом всего в 50 млн лет (!), и оба сопровождалась излиянием базальта, которое всегда влечет за собой увеличение количества углекислоты в океане и в воздухе, в разы превышающее исходные показатели. Некоторые данные указывают, что на своем пике содержание CO_2 в атмосфере составляло 2000–3000 ppm. Сравните с современным (2014 год) состоянием — 400 ppm. А ведь концентрация углекислоты во время излияния базальтов не просто возросла — она резко подскочила!

Уничтожение растительной жизни создало разрыв в круговороте углерода и изменило соотношение углерода-12 и углерода-13. Данное соотношение, которое уже не раз упоминалось в этой книге, по-видимому, можно считать признаком массовых вымираний. Однако данный случай — на границе триаса и юры — был обнаружен не ранее 2001 года, когда Питер Уорд и его коллеги опубликовали результаты своего исследования, проведенного на морском побережье одного из островов Хайда-Гуаи, в местности древних лесов, низких температур и большой влажности^[187]. Как и во время девонского и пермского парниковых вымираний, соотношение изотопов сместилось от C_{13} к C_{12} , что объясняется изменениями в количестве, видовом составе и истории захоронения останков разнообразных организмов на планете.

Такой сигнал показывает, что, вероятно, в девоне и перми вымирания произошли не из-за столкновения Земли с небесным телом. Выводы о том, что и триасово-юрское вымирание — из того же ряда парниковых, не согласуются, однако, с находками, которые были сделаны уже после того, как стало известно о фактах соотношения изотопов углерода. Пол Олсен из Колумбийского университета и его коллеги сообщили, к большой радости журналистов, что в действительности триасово-юрское массовое вымирание было вызвано столкновением нашей планеты с большим небесным телом. Была в этом какая-то красивая симметрия: эра динозавров как будто началась с падением астероида, а затем, спустя 135 млн лет, окончилась также из-за падения астероида. Так, по крайней мере, может показаться. Олсен обнаружил доказательства своей теории столкновения в районе Ньюарка в штате Нью-Джерси — в том самом месте, где можно встретить больше всего следов жизнедеятельности динозавров позднего триаса и раннего юрского периодов. Журналистов почему-то всегда особенно интересуют случаи объединения этих двух компонентов: динозавров и массовых смертей.

Олсен с коллегами обнаружили в Нью-Джерси иридиевую аномалию в континентальных отложениях на границе триаса и юры. Такая же аномалия заставила Альвареса и его группу (в

1980-е годы) допустить возможность столкновения Земли с астероидом в конце мелового периода. Иридий стал стандартным показателем случаев столкновения планеты с небесными телами. Тем не менее обсуждаемые нами исследования различны по результатам. Группа Альвареса прослеживала физические и геохимические свидетельства массовой гибели мелких обитателей океана во времена, совпадающие со столкновением, а в статье Олсена о событиях в триасе говорится о физических и геохимических данных совершенно противоположного свойства: Олсен и его коллеги обнаружили, что в исследуемых ими отложениях отражается, скорее, бурное развитие численности и разнообразия животных в период, совпадающий со столкновением!

Группа Олсена изучала образцы, собранные из отложений на суше (точнее, в ручьях и мелких озерах на суше), и окаменелости были не останками животных, а следами их жизнедеятельности. И все же, несмотря на различия своих исследований и тех, что проводил Альварес, Олсен и его коллеги пришли к тому же заключению: 200 млн лет назад, на границе триаса и юры, Земля столкнулась с большим астероидом, и, как во времена мел-палеогенового вымирания, досталось и динозаврам. Но аргументом Олсена, в частности, было и то, что столкновение привело к гибели конкурентов динозавров, тем самым простимулировав увеличение размеров и разнообразия последних. В отличие от команды Луанн Беккер, которая проводила свои изыскания о пермском вымирании в глубокой тайне, Олсен позвал всех желающих посмотреть на его находки, и многие специалисты в области массовых вымираний в самом деле поехали смотреть.

Образцы Олсена действительно содержали иридий, многие лабораторные проверки это подтвердили, чего не скажешь о работах Беккер. Но иридий сам по себе не может обеспечить палеонтологическим исследованиям публикацию в одном из самых уважаемых научных журналов — *Science* Олсен и его коллеги обеспечили в своей работе с образцами из Нью-Джерси совершенно иное направление доказательств. В многочисленных образцах того же периода, что и породы с иридием, команда Олсена отметила хорошо просматриваемые отличия в отпечатках следов жизнедеятельности животных. Прекрасно сохранившиеся трехпалые следы, известные в Нью-Джерси уже более двух веков, показывают рост численности, размеров и разнообразия форм.

Ожидалось, что следы, найденные в отложениях, образованных после триасово-юрского вымирания, покажут меньшую численность животных, меньшее разнообразие видов и меньшие размеры, поскольку один урок мел-палеогенового вымирания, вызванного падением астероида, мы хорошо усвоили — астероид привел к массовой гибели именно крупных существ. Во время мел-палеогенового вымирания погибли не только крупнейшие из известных динозавров, но и многие другие, размерами не крупнее тех, следы которых обнаруживаются в позднем триасе и раннем юрском периоде. В общем, если бы триасово-юрское вымирание было вызвано падением астероида, то после него существовало бы намного меньше видов, и они были бы гораздо меньшего размера. Но следы животных в отложениях на границе триаса и юры показывают обратное: и самих следов больше, и формы разнообразнее, и размеры намного крупнее, чем самые крупные из всех следов собственно триасового периода. Именно эти обстоятельства, а не иридий, убедили редакторов, что данное исследование достойно публикации в *Science*.

Работу Олсена и его коллег^[188] со всей тщательностью проанализировали два эксперта в области последствий столкновений Земли с небесными объектами — Фрэнк Кайт из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе и Дэвид Кринг из Университета Аризоны. Оба были убеждены, что наличие иридия свидетельствует о факте столкновения в тот момент геологического времени, и оба указали, что количество иридия, обнаруженное

командой Олсена в разных местах, существенно меньше, чем в любой из областей, известных отложениями мел-палеогенового вымирания. Итак, что-то действительно упало на Землю, но настолько небольшое, что не могло привести к масштабному вымиранию. Поэтому, хотя возможность столкновения Земли с небесным телом в конце триаса оказалась более вероятной, чем в конце перми, по-прежнему сложно поверить, что триасово-юрское вымирание было вызвано именно столкновением, как, например, в случае мел-палеогенового вымирания.

В Квебеке действительно есть большой кратер. Он один из самых больших хорошо различимых даже из космоса кратеров на планете, его название — Маникуаган, его диаметр — около 100 км (Чуксулуб, например, 180–200 км в диаметре).

Долгое время считалось, что Маникуаган появился 210 млн лет назад, то есть во время триасово-юрского вымирания, и может быть следом от астероида. Однако более точный анализ позволил определить, что Маникуаган старше — около 214 млн лет. Радиоактивный метод показал, что триасовый период закончился около 201 млн лет назад, то есть он моложе Маникуагана.

Наши собственные исследования на островах Хайда-Гуаи были сосредоточены в первую очередь на триасово-юрском вымирании, но мы также хотели найти доказательства вымирания более раннего периода в породах, которые относили к возрасту около 214 млн лет. Кривые вымираний, построенные в конце XX века, показывали возможность того, что падение астероида, который мог оставить кратер такого размера, как Маникуаган, привело бы к гибели четверти или даже двух третей всех видов на планете — но мы ничего такого не нашли! Может, мы переоценили разрушительную силу астероидов?

Цвета триасового периода

Роберт Бернер, геохимик из Йельского университета, к началу XXI века значительно усовершенствовал методы измерений уровней кислорода и углекислого газа, и его компьютерные модели стали намного точнее. Теперь можно увидеть изменения уровней этих газов для каждого интервала в 10 млн лет за последние 560 млн лет. Результаты работ Бернера показывают поразительное совпадение: периоды низкого уровня кислорода (или периоды его быстрого снижения) соотносятся с событиями массовых вымираний.

Все три случая массовых вымираний, причины которых не до конца выяснены, характеризуются отложениями, сформированными в условиях с низким уровнем кислорода^[189]. При таких обстоятельствах слои отложений обычно становятся черными, потому что содержат минерал серный колчедан (пирит) и другие соединения с серой, что показательно именно для случаев с низким уровнем кислорода в среде формирования отложений.

Также интересен тот факт, что слои периодов тех трех массовых вымираний содержат чрезвычайно тонкие, даже сплюснутые, слои осадочных структур. Очень многие организмы питаются органическими остатками или строят в них норы, поэтому отложения пород в океане со времен кембрия подверглись значительной биотурбации — переработке в результате жизнедеятельности многих существ. Если слои осадочных пород очень тонки, это значит, что они формировались в местах и во время полного отсутствия или почти полного отсутствия животных.

Таким образом, у нас есть три аргумента, основываясь на которых мы можем заключить, что пермское, триасово-юрское и мел-палеогеновое вымирания происходили в периоды с очень низким уровнем кислорода: модели Бернера, минералогические факты (цвет пород) и свидетельства тонких осадочных отложений.

Открытие в конце 1990-х годов обратной зависимости уровней кислорода и углекислоты в атмосфере является еще одним важным компонентом в описании всей картины обсуждаемых случаев вымираний. Как и сведения о низких уровнях кислорода, об уровнях углекислого газа можно судить и по моделям Бернера, и по состоянию пород, в данном случае — по состоянию окаменелостей в породах. К сожалению, невозможно точно измерить количество углекислого газа, присутствовавшего в окружающей среде в определенное время в древности. Углекислый газ не влияет на цвет пород и на океанические донные отложения. И все же было проведено одно очень грамотно организованное исследование ископаемых, результаты которого стали настоящим прорывом и позволили узнать относительный объем углекислоты. Благодаря этому методу палеоботаник, например, может определить, увеличивалось ли, уменьшалось или было стабильным содержание CO_2 в определенный интервал длительностью один миллион лет. Более того, можно также выяснить, во сколько раз уровень углекислого газа превышал определенный исходный показатель или насколько был ниже его.

Как все гениальное, измерение углекислого газа оказалось простым и понятным. Ботаники, изучая листья современных растений, уже давно проводили эксперименты, в которых определенные виды растений выращивались в закрытых смоделированных условиях, уровень CO_2 при этом можно было увеличивать или уменьшать относительно содержания данного газа в сегодняшней атмосфере (это около 360 ppm в те времена, когда такие эксперименты только начали проводить). Как выяснилось, растения крайне чувствительны к уровню углекислоты в атмосфере, даже небольшие концентрации CO_2 способны влиять на

собственное содержание углерода в растениях, углерод — основной строительный материал живых организмов. Растения получают углекислый газ извне главным образом через устьица в листьях. Вырастая в условиях с повышенным содержанием CO_2 , растения образуют небольшое количество устьиц, поскольку и малого количества хватает для их жизнедеятельности при высоких концентрациях углекислоты в воздухе. Исследователь с надеждой обращает свой взор к фоссилиям растений, в листьях которых хорошо просматриваются устьица, — и результаты подтверждают данные моделей Бернера.

В конце пермского периода и в течение раннего триаса, как видно по окаменелостям растений того времени, устьиц в листьях было немного. И в периоды всех трех массовых вымираний, которые мы сейчас обсуждаем, картина та же — уровни углекислого газа были очень высоки. Более того, концентрации CO_2 в атмосфере вырастали стремительно, не за миллионы — за тысячи лет.

Мы получаем, таким образом, совершенно новое видение случаев массовых вымираний. Каждое событие происходило в мире, который за очень короткий период резко потеплел с увеличением уровня углекислого газа в атмосфере (а также прибавлялось и метана, если судить по результатам соответствующих исследований). Температура была очень высока, а концентрации кислорода — весьма малы, и два этих фактора совпали с массовым вымиранием. Хотя сегодня случаи парникового эффекта не совпадают с падением уровней кислорода (как раз наоборот, из-за фотосинтеза), все же парниковые условия способствуют повышению температуры. Солнечный свет проникает через окна, но затем, когда он отражается обратно в виде волн и теплоты, оконные стекла становятся ловушкой для энергии, благодаря которой увеличивается температура воздуха в помещении. В атмосфере такими стеклами становятся углекислота, метан и водяные пары.

Жара опасна для любого животного. Самая высокая температура, которую может вынести животное, даже в половину не достигает градуса кипения воды. Большинство животных погибает при $40\text{ }^\circ\text{C}$, а те, кто смог перенести такую температуру, погибают при $45\text{ }^\circ\text{C}$. Известно много несчастных случаев, когда дети погибали в закрытых машинах, что однозначно говорит о смертельной опасности, исходящей от быстрого повышения температуры. Два аспекта физиологической системы — количество кислорода в окружающей среде и количество тепловой энергии — в совокупности создают довольно трудную комбинацию для жизни: при повышении температуры животным требуется больше кислорода.

Из всех трех обсуждаемых случаев массовых вымираний данные об увеличении содержания CO_2 во время триасово-юрского вымирания особенно поразительны. Дженни Макэлвейн, палеоботаник из Чикагского университета, собрав и исследовав образцы пород в труднодоступных оледенелых местностях Гренландии в конце XX века, пришла к выводу, что, без всякого сомнения, в конце триаса произошло резкое увеличение содержания углекислого газа в атмосфере при уже весьма низком уровне кислорода.

Триас становится в нашем понимании все больше похож на конец перми. На что он *точно* не похож, так это на мел-палеогеновое вымирание, когда гибель животных произошла неожиданно и были затронуты практически все группы животных и растений, при этом ни животные, ни растения не смогли «предвидеть» вымирание по экологическим признакам и не успели приспособиться.

В конце триаса, наоборот, все группы, за исключением ящерообразных динозавров, сильно измельчали (при этом, в лучшем случае, не потеряли в разнообразии видов), и размеры уменьшались как до, так и после самого триасово-юрского вымирания, будто животные

знали, что грядут еще более трудные времена и малые размеры дадут больше преимуществ для выживания.

Группы с примитивными легкими (земноводные и ранние рептилии) поплатились особенно сильно, и многие группы, которые процветали в раннем триасе, например, фитозавры, вымерли полностью. И земноводные, и архозавроморфы, вероятно, имели совсем простое устройство легкого, которое работало исключительно за счет движений реберной мускулатуры. Млекопитающие и более развитые терапсиды в те времена, по-видимому, уже имели диафрагму, а потому их существование подвергалось меньшей угрозе. Крокодилы, которые ползали на брюхе и предположительно имели «печеночный поршень», напротив, чувствовали себя неважно. Выживаемость ящерообразных в те времена можно объяснить несколькими причинами (особенности питания, стойкость к высоким температурам, способность избегать хищников, эффективная система размножения), однако мы думаем, что они обязаны выживанием своему уникальному устройству легких — в них имеется множество перегородок-лепестков, которые увеличивают площадь поверхности. Эти легкие были намного эффективнее, чем у многих других групп животных, и в условиях низкого уровня кислорода в воздухе (конец триаса — начало юры) такая система дыхания оказалась намного более конкурентоспособной. Вот так ящерообразные стали господствующей группой существ на планете в конце триасового периода и сохраняли свое доминирующее положение в юрском периоде за счет высокоактивного уровня жизнедеятельности.

Сегодня известно, что из всех морфологических типов рептилий среднего триаса ящерообразные динозавры демонстрировали остановку в развитии своего видового разнообразия либо число их структурных типов даже уменьшалось. Также известно, что за последние 500 млн лет содержание кислорода в окружающей среде достигло наименьшего уровня в конце триасового периода. У ящерообразных имелась некая особенность, позволившая им выжить при серьезном дефиците кислорода. Факты говорят, что долгое и медленное падение уровня кислорода достигло своего дна как раз в период триасо-юрского массового вымирания, но следует также учесть, что данное вымирание имело на самом деле два этапа, отделенных друг от друга 3–7 млн лет.

На планете существует несколько мест, где этот временной интервал можно увидеть по фоссилиям многочисленных позвоночных. Нам не известен точный характер вымирания позвоночных, а вот вымирание организмов в океане мы можем представить себе яснее. Нам не известно, как быстро исчезли наиболее заметные жертвы триасо-юрского вымирания: фитозавры, этозавры, примитивные архозавроморфы, тритилодонтовые терапсиды. Однако удалось установить, что ко времени, когда в океане раннего юрского периода появились разнообразные головоногие и оставили нам в юрских породах подтверждения праздничного изобилия жизни, динозавры уже господствовали в мире. Какие же у них были легкие? Определенности тут нет, но мы точно знаем: их легкие и система дыхания хорошо работали в условиях самого ужасного кислородного кризиса за всю историю Земли.

Новое понимание тех событий включает в себя следующее: ящерообразные динозавры подверглись вымиранию в меньшей степени, чем все прочие группы сухопутных позвоночных, благодаря своей более развитой системе дыхания, а именно наличию впервые появившейся в эволюции системы воздушных мешков. Самое потрясающее в динозаврах то, что во время триасо-юрского массового вымирания ящерообразные энергично *увеличивали* свою численность.

Глава 14

Эра динозавров:

230–180 миллионов лет назад

Слово «юрский» теперь прочно ассоциируется с динозаврами и знаменитым парком развлечений из известного фильма. В действительности юрский период не имеет ничего общего с тем, как его изобразили в кино. В тех парках растут деревья и кусты, которых еще не было в юрский период, — это всем известные сегодня цветковые растения. Вообще, единого представления о юрском периоде быть не может, поскольку мир невероятно переменялся с момента первых проявлений тех черт, которые традиционно относят к данному периоду (около 201 млн лет назад), и до последних этапов (135 млн лет назад). В начале периода это был мир, сильно пострадавший от последнего массового вымирания, — коралловые рифы пропали, а немногочисленные динозавры были малы ростом и не разнообразны. Кислорода было так мало, что насекомые едва могли летать, но это не имело значения, поскольку не было летающих позвоночных, которые бы могли на них охотиться. Однако такому положению дел суждено было измениться в относительно скором будущем, по крайней мере в рамках геологических представлений о скорости.

К концу юрского периода обычными стали крупнейшие за всю историю планеты животные — динозавры, венец творения, а вот маленькие примитивные птички и еще более мелкие примитивные млекопитающие ютились на задворках экосистем. В начале периода моря настолько опустели, что на короткий период даже вернулись строматолиты, а крупных рыб и хищных животных было чрезвычайно мало.

Конец юрского периода — это также мир самых разнообразных и необычных морских обитателей, которые когда-либо населяли земные океаны: длинношеие рептилии-плезиозавры, дельфинообразные ихтиозавры, а также множество прекраснейших примитивных рыб, подобных современным сарганам и осетрам (и те и другие — со странными щитками на теле), которые плавали среди обширных коралловых рифов. Океаны были населены большим количеством всевозможных головоногих и их близких родственников, похожих на креветок, — белемнитов. Аммониты-головоногие были представлены огромной группой существ всевозможных форм: от плоскоспиральных тел до причудливых конусов, изгибавшихся изящной дугой (такие появились уже к концу юры). Крупнейшие из головоногих найдены именно в породах юрского периода, например, гигант из Британской Колумбии, обнаруженный возле города Ферни, был около 2,5 м в диаметре и наверняка весил не меньше полутонны. Однако все эти богатства природы подкинули ученым очередную диковинную загадку: большинство животных того периода бесследно исчезли, и их место в экосистемах так и осталось незанятым.

Честно признаться, геология как современная научная отрасль своим появлением обязана именно юрскому периоду. Данные о юрских отложениях наносил на свои карты «отец английской геологии» Уильям Смит в начале XIX века, по юрским отложениям было установлено, что слои осадочных пород из разных районов, непосредственно не связанных между собой, могут сопоставляться по содержащимся в них остаткам ископаемых организмов. Образцы ископаемых головоногих из слоев юрского периода дали Дарвину возможность выявить примеры эволюционных изменений (ссылки на работы по тому периоду мы давали еще в главе 1, и конечно, мы рекомендуем труды по истории естественных наук Мартина Рудвика).

Юрский период демонстрирует ту же модель эволюционного взрыва, который можно наблюдать после каждого массового вымирания. Это называется периодом восстановления. В каждом случае сразу после вымирания в природе остается небольшое число выживших видов, и заканчивается такое затишье лишь 5–10 млн лет спустя. Затем, после этого небольшого «похмелья» эволюция оживляется, и развитие видового разнообразия снова набирает обороты. При этом животные и растения всегда отличаются широким спектром совершенно новых видов. В большинстве случаев новые формы возникают в течение восстановительного периода, но иногда бывает, что типы организмов, которые до вымирания характеризовались немногочисленностью видов, но каким-то образом выжили, после биологической катастрофы демонстрируют бурный рост численности и экологической успешности в обновленном мире.

Юрский период не стал исключением, и во время восстановительного периода возникло множество новых морских обитателей, представленных большим количеством моллюсков, морских рептилий, а также многими видами костных рыб. Впрочем, не морскими существами прославился юрский период (как и следующий за ним меловой). Никто не станет снимать блокбастеры о морских тварях со словом «юрский» в заголовке. Публика хотела и по-прежнему требует лишь одного — *динозавров*.

Невозможно представить себе книгу по истории развития жизни без длинной-предлинной главы о динозаврах. Но если исходить из названия нашей книги, динозавры кажутся неподходящей темой, ведь мы обещали что-то *новое*. Уже столько написано о «допотопных ящерах» (так их называли в Викторианскую эпоху), что, кажется, отыскать что-нибудь новое невозможно. Поэтому приятным сюрпризом стали открытия, потрясшие науку XXI века. Любой обзор о динозаврах для неспециалистов обычно содержит три вещи: были ли они теплокровными, как они размножались и как же они все-таки вымерли? Но есть ведь и другие, не менее интересные вопросы! Например, самый интригующий: почему они вообще появились? Или, по крайней мере, почему возник их тип строения тела? Последний, конечно, напрямую связан с вопросом о системе дыхания этих существ. В нашей книге мы затронем и другой момент, связанный с дыханием динозавров: что нового стало известно о связи динозавров и птиц?

Очень много новых фактов обнаружено коллегами из Китая, хотя и авторы данного сочинения сами также узнали кое-что новое в экспедиции в Антарктиду. Наконец, новый век снабдил нас информацией по двум фундаментальным аспектам физиологии динозавров: дан определенный ответ об их теплокровности и об эволюции их размеров. И тут мы снова вернемся к одному из самых увлекательных моментов истории развития жизни: чем отличаются динозавры от настоящих птиц? Не просто от летающих динозавров, а от существ, которые имеют все признаки птиц, какими мы их знаем.

Почему появились динозавры?

Чтобы рассказать историю динозавров *по-новому*, нам придется вернуться к временам, на несколько миллионов лет предшествующим триасово-юрскому массовому вымиранию, на котором закончилась предыдущая глава. Динозавры были королями мира в юрском и меловом периодах, а в триасовом периоде они были одной из малочисленных и бедных в видовом отношении групп позвоночных, пытавшейся выжить при дефиците кислорода. Снова и снова, однако, мы сталкиваемся с тем, что времена кризиса стимулируют появление новых эволюционных решений. Таксономическое разнообразие оставалось небольшим, но морфологическая диспропорция — мера изменений (в случае с динозаврами — радикальных изменений) в строении тела — возросла многократно. Можно провести аналогию с тем, что рассказывал в своей книге «Битва за космос» Том Вулф^[190]: когда в конце 1950-х годов стали выпускать новые большие реактивные самолеты, летчики-испытатели рано или поздно должны были сделать «мертвую петлю». Вулф описывает реакцию летчиков, спокойно проходящих маневр: попробуем способ А..., не вышло..., способ В..., способ С..., способ... В конце триаса многие организмы были теми самолетами, а эволюция — испытателем, который постоянно пробовал один за другим новые анатомические варианты. Вариантом, который сработал в «мертвой петле» (в среде с очень низкой концентрацией кислорода), оказались динозавры, у которых возник новый тип легких — биосфера таких еще не видела.

Примерно 200 млн лет назад, всего через 50 млн лет после катастрофы пермского вымирания, также не без жертв закончился триасовый период. В предыдущей главе мы указывали, что только ящерообразные избежали губительного воздействия триасово-юрского вымирания. Этот случай вымирания затронул не только сухопутных обитателей, но также исчезли почти все головоногие, однако в раннем юрском периоде они эволюционировали в три большие группы: наутилоидеи, аммониты и колеоидеи (двужаберные). Снова разрослись каменистые кораллы, а дно освоили двустворчатые моллюски. Главными хищниками опять стали морские рептилии: ихтиозавры и плезиозавры.

На суше процветали динозавры, млекопитающие уступали им и размерами и числом, а потому были малым сегментом сухопутной фауны, хотя к концу мелового периода демонстрировали значительную биологическую радиацию, появилось множество новых групп млекопитающих, которые живы и по сей день. В конце юры от динозавров произошли птицы. Все это хорошо известно, а потому мы не будем подробно останавливаться на подобных моментах. Давайте лучше взглянем на изменения уровней кислорода в юрском периоде и сравним эти показатели с числом и видами динозавров того самого — древнего — парка юрского периода.

Главной проблемой, которая всех занимает в разговорах о динозаврах, является вопрос их вымирания. Люди постоянно обсуждают теорию Альвареса 1980-х годов о падении 65 млн лет назад гигантского астероида, которое привело к мел-палеогеновому вымиранию, коснувшемуся в первую очередь именно динозавров. Каждые несколько лет обнаруживаются какие-нибудь новые факты, постоянно подогревающие интерес к данному вопросу. Разговоры о проблеме вымирания динозавров хоронят под собой попытки обсуждения их теплокровности, например, Наименее захватывающий из всех, в самом низу списка вопросов о динозаврах, стоит «антипод» вопроса о вымирании: почему и как динозавры вообще появились? Разумеется, нам известно, когда они появились: во второй трети триасового периода (около 235 млн лет назад). И конечно, мы знаем, как эти первые динозавры выглядели: многие походили на своих огромных «классических» потомков — тираннозавров

и аллозавров, двуногие формы, которые быстро обрели большие размеры. Но вот что мало кому известно и редко обсуждается даже в среде специалистов, это факт, что 230 млн лет назад уровень кислорода опустился, возможно, до самых низких своих показателей со времен кембрия.

Так почему же все-таки динозавры? Сегодня имеется несколько вариантов ответа на этот вопрос. Динозавры появились, потому что было пермское вымирание, которое открыло дорогу эволюции новых форм. Динозавры появились, потому что у них развилась структура тела, весьма эффективная для выживания в триасовый период. Однако эти выводы кажутся недостаточными. Палеонтолог из Чикаго Пол Серено, который обнаружил образцы самых древних ископаемых динозавров, а происхождение динозавров является его основным научным интересом, пытается посмотреть на проблему под другим углом. В 1999 году он выпустил книгу *The Evolution of Dinosaurs* («Эволюция динозавров»), в которой, в частности, отметил: «На сегодняшний день происхождение динозавров на суше в конце триаса выглядит таким же случайным, как и их гибель и вытеснение млекопитающими в конце мелового периода». Пол Серено предполагает, что развитие динозавров с момента их появления было очень медленным и начиналось с совсем малого количества видов. Это мнение серьезно отличается от привычных представлений о том, как работает эволюция, если появляется новый и потенциально успешный морфологический тип: сначала происходит «взрыв», интенсивная апробация новыми видами анатомической находки в течение относительно короткого периода. С динозаврами, оказывается, было не так. Серено пишет: «Биологическая радиация динозавров, начавшаяся с двуногих существ не более одного метра в длину, проходила медленнее, и в ней слабее, по сравнению с млекопитающими, проявлялась адаптивность форм к окружающей среде».

Миллионы лет разнообразие динозавров, как и прочих сухопутных позвоночных, оставалось относительно небольшим, что для Серено и других исследователей все еще непонятно. Теперь эту странность вполне можно объяснить.

В истории развития жизни животных на Земле повторяется одно и то же соотношение уровней атмосферного кислорода и разнообразия видов, а также их размеров: во времена, когда уровень кислорода низкий, разнообразие и размеры существ также невелики, и наоборот. По-видимому, то же самое произошло и с динозаврами. В 2006 году Питер Уорд в книге *Out of Thin Air* («Как будто из ниоткуда») впервые со всей очевидностью показал взаимосвязь размеров и форм динозавров и уровней кислорода.

Если разнообразие динозавров действительно зависело от количества кислорода в атмосфере, то чрезвычайно малое количество данного вещества в атмосфере позднего триаса полностью объясняет медленное развитие видового разнообразия этих организмов с момента их появления.

Период низкого уровня кислорода стал временем гибели многих видов животных (хотя при этом эволюция энергичнее экспериментировала), подтверждения тому можно обнаружить при сравнении показателей атмосферного кислорода и разнообразия видов динозавров в интервале от начала триаса и до конца мелового периода. Палеонтолог и специалист по осадочным породам Дэвид Фастовски и его коллеги опубликовали в 2005 году работу, в которой показано, что таксономический состав динозавров оставался неизменным, начиная с момента появления первых динозавров второй половины триаса и до конца первой половины юрского периода. Только в конце юрского периода число динозавров заметно возросло, и этот рост неуклонно продолжался до конца мелового периода, за исключением кратковременного затишья в начале последней трети мела.

К концу мелового периода, 84–72 млн лет назад (так называемый кампанский ярус

верхнего мела), существовало в сотни раз больше динозавров, чем в триасовом и юрском периодах. Что стало причиной такого мощного прорыва в развитии?

Можно предположить, что и здесь свою роль сыграло изменение ситуации с кислородом. В позднем триасе и первой половине юры число динозавров было небольшим и оставалось неизменным, так же как и количество атмосферного кислорода (по сравнению с современным состоянием). Постепенно в юрском периоде уровень кислорода повышался, достигнув отметки 15 %, а затем и 20 % на последних временных этапах данного периода. И лишь тогда стало возрастать количество видов динозавров. Количество атмосферного кислорода постепенно увеличивалось, и в течение мелового периода то же самое происходило с динозаврами. Вторая половина мелового периода была настоящим «золотым веком» динозавров. Конец юрского периода, когда произошло заметное повышение уровня кислорода, стал также временем увеличения *размеров* динозавров, тогда появились самые крупные динозавры из всех известных, которые просуществовали вплоть до конца мела.

Разумеется, для процветания динозавров в меловом периоде имелись и другие причины. Например, в середине мела произошла революция в мире растений — появились покрытосеменные (цветковые) формы, которые в конце мелового периода в значительной степени вытеснили хвойные, доминировавшие в юрском периоде. Распространение цветковых привело к увеличению количества растений, а это стимулировало развитие видового разнообразия насекомых. Во всех экосистемах наблюдалось большое разнообразие ресурсов, что могло послужить причиной развития разнообразия в принципе. Однако связь между уровнем кислорода и разнообразием живых существ, а также уровнем кислорода и размерами животных постоянно прослеживается у всех групп организмов — от насекомых до рыб, от рептилий до млекопитающих. Так почему же динозаврам быть исключением?

Динозавры появились в тот период (или непосредственно перед тем), когда уровень кислорода в триасе достиг своего минимума (около 10–12 %, сегодня такие показатели можно встретить на высоте 4500 м над уровнем моря). Это был самый низкий уровень за последние 500 млн лет. В качестве реакции многие животные изменили строение своих тел, динозавры тоже. Морфологически динозавры совершенно не похожи на более ранних пресмыкающихся, и появились они в период почти смертельной жары (очень высоких мировых температур) и резкого дефицита кислорода. Возможно, это совпадение, но едва ли, поскольку появление многих признаков «динозавровости» может быть объяснено стремлением адаптироваться к дефициту кислорода. Изначально анатомия динозавров (возникшая из анатомии ящерообразных вроде ставрикозавра или более раннего герреразавра) была в некоторой степени реакцией на недостаток кислорода в среднем триасе, иными словами, строение тела динозавров, в том числе двуногость, своим происхождением обязано именно дефициту кислорода. Двуногость первых динозавров позволила преодолеть проблему дыхания, которая имелаась у более ранних рептилий в соответствии с ограничением Каррьера. Таким образом, недостаток кислорода привел к появлению динозавров за счет эволюции определенного морфологического типа тела. Условия обитания в мире, где в атмосфере содержится всего 10 % кислорода, совершенно неверно представляются. Это количество кислорода, существующее, например, на высоте самых высоких вулканов на Гавайях, где находится обсерватория Кека, — здешние астрономы расскажут вам многое о быстрой утомляемости и потере умственной концентрации в условиях дефицита кислорода. Однако невозможно хорошо понять, что представлял собой мир позднего триаса, если просто сравнить его с состоянием атмосферы на больших высотах, поскольку там не хватает не только кислорода — там возникает недостаток всех газов. Один из этих газов — водяной пар, который имеет непосредственное влияние на развитие птичьих яиц на большой высоте.

К недостатку кислорода — самому важному ограничителю эволюции сухопутных организмов — в позднем триасе следовало приспособиться весьма основательно, вот и появились первые динозавры. Все они были сначала двуногими, у них была принципиально новая система дыхания — с учетом недостатка кислорода самая эффективная на тот момент. Существа, которые пришли к нам из тех времен и которых мы называем птицами, до сих пор сохраняют черты того эволюционного прорыва.

Первые настоящие динозавры, судя по фоссилиям, были двуногими и произошли от примитивных двуногих архозавроморфов в первой половине триаса. Те архозавроморфы были также предками крокодилов и, возможно, являлись теплокровными или, по крайней мере, развивались в этом направлении. В данной группе организмов двуногие являлись преобладающим морфологическим типом, и какое-то время существовали даже двуногие крокодилы. Почему двуногие? Как это помогло приспособиться к недостатку кислорода?

Современные ящерицы не могут дышать при беге, а у них были сотни миллионов лет, чтобы завоевать себе такое право. Такое физиологическое ограничение возникло у них из-за «лежачего» положения тела. Современные млекопитающие демонстрируют определенный синхронный ритм движений конечностей и дыхания. У лошадей, кроликов, гепардов и многих других один вдох приходится на один шаг. Их конечности находятся полностью под корпусом тела, и поэтому позвоночник данных четвероногих млекопитающих в основном неподвижен в отличие от позвоночника ползающих рептилий. Позвоночник млекопитающих слегка изогнут книзу, а при беге выпрямляется, и такое движение вверх-вниз скоординировано с вдохом и выдохом. Такая система, впрочем, появилась только у настоящих млекопитающих, в триасе. Даже самые развитые цинодонты триаса не имели полностью поднятого на опорные конечности туловища и поэтому, вероятно, испытывали неудобство или даже страдание, если пытались бежать и дышать одновременно.

Если существо передвигается на двух, а не на четырех ногах, движение слабо затрагивает работу ребер и легких, дыхание и передвижение механически не взаимосвязаны. Двуногие могут делать столько вдохов-выдохов, сколько потребуется, даже при быстром беге. Во времена дефицита кислорода, но хорошо развитых отношений «охотник — жертва» даже незначительное преимущество либо в преследовании добычи, либо в убегании от хищника существенно повышало способность к выживанию. Ползающие хищники позднего пермского периода, например, ужасные горгонопсы, нападали, как и большинство хищников того периода и более ранних времен, из засады, как все современные ящерицы. Хищники, которые ищут и преследуют добычу, должны иметь большую скорость и выносливость. Что стало с другими животными триаса, когда они поняли, что впервые в истории хищники энергично рыщут в поисках пищи, а не прячутся, поджидая жертву?

Крокодилы и динозавры произошли от общего четвероногого предка, жившего в триасовом периоде. Вероятно, это существо было пресмыкающимся из Южной Африки — эупаркерией. В классификации группа этих животных имеет название *Ornithodira*, и с самого начала своего существования в ней стали развиваться признаки двуногости. Данный процесс можно проследить по лодыжкам в останках животных данной группы — эти сочленения эволюционировали из сложных систем, свойственных четвероногим, до простого шарнирного сустава. Такое устройство лапы, постепенное удлинение задних конечностей по отношению к передним, а также удлинение шеи, которая приобрела форму сглаженной буквы «S», — все это свидетельствует о неуклонном развитии устройства тела, характерного для двуногих. В дальнейшем *Ornithodira* разделились на две четко разграниченные определенными признаками группы. Одна улетела в небеса — птерозавры. Возможно, первыми из них были склеромохлусы из позднего триаса. Эти все еще сухопутные создания,

по всей вероятности, очень быстро бегали, а затем научились недолго планировать между прыжками, чему способствовали складки кожи между передними и задними конечностями. Самый древний по-настоящему летающий птерозавр также относится к позднему триасу и называется эудиморфодон.

Итак, птерозавры эволюционировали в летающих существ. Их братья из другой группы *Ornithodira* постепенно превратились в динозавров и обрели соответствующую анатомию. Переходной формой от *Ornithodira* к собственно динозаврам считается лагозух — нечто среднее между четвероногим и двуногим животным. Возможно, он медленно передвигался на четырех лапах, но мог становиться на задние лапы, чтобы увеличить скорость для преследования добычи — он был хищником. Однако его передние и задние конечности еще не похожи на те, что соответствуют строению настоящих динозавров, поэтому в биологических классификациях лагозухов не относят к динозаврам. Но после них появились герреразавры, которые имеют соответствующие признаки и классифицируются как *первые* динозавры. Впрочем, как будет показано позднее, в строении герреразавров отсутствовала одна важная характеристика, которая тем не менее появилась у их непосредственных наследников, — это особая дыхательная система, способная справляться с недостатком кислорода в атмосфере Земли того периода.

Первый динозавр был в полном смысле двуногим^[191], мог хватать предметы передними лапами, у него даже был большой отставленный палец, как у нас. Такая пятипалая рука функционально весьма отличалась от трехпалой задней лапы-ноги (на самом деле на ноге тоже было пять пальцев, но два из них были настолько неразвиты, что при ходьбе или беге земли касались только три). Поскольку эволюция привела этих животных к двуногости, ей больше не нужно было соображать, как усовершенствовать передние лапы для опоры и передвижения по земле. Но чем же тогда занять передние конечности? Позднее у знаменитого тираннозавра передние лапки были такого размера, что многие считают, будто он их вообще никак не использовал. У первых динозавров, однако, передние конечности явно использовались, вероятно, для хватания и удерживания добычи. Задние конечности имели форму, которую мы привыкли видеть на картинках с хищными динозаврами.

Таков был морфологический тип первых динозавров, от которых потом произошли все остальные: двуногие, с длинными шеями, с хватательными передними конечностями с развитым большим пальцем, с большим мощным тазом с массивными мускулами для ходьбы и бега. Ранние формы этих двуногих были относительно невелики по размеру. В самом конце триаса они разделились еще на две группы — это было самое фундаментальное разграничение надотряда динозавров. В какой-то момент у некоторых из этих триасовых двуногих произошла модификация положения лобковой кости. Любой школьник теперь знает, что это изменение в строении таза придало развитию динозавров два различных направления: более древние формы называются ящеротазовые, а их потомки, с которыми они делили господство на планете последующие 170 млн лет, — птицетазовые.

Одним из наших исследовательских интересов, бесспорно, является вопрос о том, как динозавры дышали^[192]. Известно, что их дыхательная система серьезно отличалась от дыхательной системы современных хладнокровных рептилий, но при этом была очень похожа на дыхательную систему современных теплокровных птиц. Легкие современных высших позвоночных (рептилий, птиц и млекопитающих) делятся на два основных типа (хотя мы увидим, что существует больше двух систем дыхания, включая легкие, циркуляцию крови и тип кровяного пигмента). Оба типа легких вполне могли развиваться от легких единого предка рептилий из каменноугольного периода, у которого они были простыми воздушными мешками. Все современные млекопитающие имеют легкие альвеолярного строения, а у

современных черепах, ящериц, птиц и крокодилов (то есть у всех остальных) строение легких складчатое. Альвеолярные легкие состоят из миллионов пузырьков, пронизанных кровеносными сосудами. Пузырьки и называются альвеолами. Воздух поступает в эти пузырьки и затем выходит наружу, то есть система работает в обе стороны.

Млекопитающие, и мы в их числе, пользуются такими легкими, и для нас привычным является этот постоянный процесс «туда-сюда». Воздух втягивается в альвеолы, а затем выдыхается обратно, кислород и углекислый газ меняются местами. Вдохи-выдохи осуществляются комбинацией движений ребрами (благодаря мускулам, конечно) и сокращением системы мышц, называемых диафрагмой. Сокращение диафрагмы приводит к расширению легких и увеличению их объема. Два этих движения — расширение грудной клетки за счет движений ребер и сокращение диафрагмы — уменьшают давление воздуха внутри легких и обеспечивают вдох. Выдох происходит частично мягким сокращением каждой альвеолы: когда в них попадает воздух, они расширяются, но затем через некоторое время естественным образом сжимаются из-за эластичных свойств ткани их стенок. Многочисленность альвеол делает такое дыхание эффективной системой поглощения кислорода, который очень нужен теплокровным млекопитающим в их активной жизнедеятельности. Однако то, что воздух входит и выходит одним и тем же путем, делает данную систему не такой уж успешной из-за количества энергии, затрачиваемой на сам процесс получения кислорода^[193].

В отличие от легких млекопитающих, складчатые легкие рептилий и птиц являются одной большой альвеолой. Чтобы увеличить площадь поверхности для дыхательного обмена, в таких легких находится множество листообразных складок ткани, направленных внутрь воздушного мешка, потому такие легкие и называются складчатыми. Существует несколько вариантов устройства такой системы легких. Одни имеют несколько меньших отделов, другие — вторичные воздушные мешки, которые располагаются отдельно от легких, но соединены с ними трубками. Как и у альвеолярных легких, у большинства складчатых воздух входит и выходит одним общим путем, однако были и исключения, и недавние открытия изменили наше представление не только о природе ранних рептилий, но и об их судьбе во время пермского массового вымирания.

Складчатые легкие не эластичны, а потому не сжимаются автоматически через какое-то время после вдоха. Вентиляция легких также различается от группы к группе. Чтобы втянуть воздух, ящерицы и змеи используют движение ребер, но, как мы уже видели, передвижение мешка мешает полному расширению легочной полости у ящерицы, а потому эти животные не могут дышать при передвижении.

Различные модификации складчатых легких создают большее разнообразие этого типа дыхательной системы, чем в случае с альвеолярными легкими. Например, у крокодилов есть и складчатые легкие, и диафрагма, но этого последнего органа нет у змей, ящериц и птиц. Впрочем, диафрагма крокодилов не похожа на аналогичный орган млекопитающих: у крокодилов она состоит из соединительной ткани, прикреплена к печени, движения такой «печеночной» диафрагмы похожи на работу клапана или насоса, и помогают ему при этом мышцы таза. У млекопитающих (и человека) диафрагма давит на печень в таком же режиме, что и у крокодилов, создается некий внутренностный насос, но только вот сам процесс действия данной механики заметно отличается.

До недавнего времени складчатые легкие крокодилов и аллигаторов считались относительно примитивными, а потому малоэффективными. Но затем нам пришлось пересмотреть наши представления о дыхательных возможностях современных организмов, а также сформировать совершенно новое видение эволюции рептилий в период пермского

массового вымирания и далее — в течение триаса.

Самый неэффективный способ дыхания — у млекопитающих, у них (у нас) вдох-выдох осуществляется через один и тот же канал. Неэффективность обусловлена столкновением молекул газа в момент окончания выдоха и начала вдоха. При любом ускорении дыхания возникает хаотичное столкновение выдыхаемого воздуха на его пути наружу с начинающим поступать внутрь воздушным потоком, и некоторое количество выдыхаемого воздуха — с большей концентрацией CO_2 и меньшей — O_2 — снова устремляется в легкие. Долгое время полагали, что крокодилы испытывают ту же трудность. Однако в 2010 году было обнаружено, что на самом деле крокодилы используют отдельный односторонний воздушный проход, схожий с аналогичным органом птиц и динозавров. Новые данные касаются также того, что у древних пермских и триасовых предков рептилий, которые в конце концов породили современных птиц и крокодилов, а также вымерших динозавров, органы дыхания были куда более эффективными, чем у их современников-терапсид (прародителей млекопитающих). Те древние предки современных рептилий и птиц прошли сквозь горнило пермского вымирания благодаря двум серьезным преимуществам: они были холоднокровными и способными извлекать из воздуха больше кислорода, чем млекопитающие (чем рептилии, породившие потом млекопитающих). Нас, млекопитающих, подставили! У нас никогда не было больших шансов выиграть в борьбе за выживание в периоды вымираний, не говоря уж об экологическом господстве. Млекопитающие мезозоя были не больше крыс, и им было по-настоящему страшно — кругом одни динозавры!

Система воздушных мешков у птиц

Итак, в конце предыдущего раздела мы обсуждали складчатые легкие — один из типов легких у сухопутных позвоночных. Лучшим примером такого типа легких и дыхания в целом может служить система дыхания птиц. В данной системе сами легкие малы и почти неподвижны. Легкие птиц, в отличие от легких млекопитающих, лишь незначительно расширяются и сжимаются при каждом вдохе-выдохе. Тем не менее грудная клетка интенсивно работает. Ребра, которые находятся ближе всего к тазовой области, присоединены к нижней части грудины таким образом, чтобы птицы могли очень легко двигаться, подобное устройство играет крайне важную роль во всей системе. И это еще не все отличительные признаки системы дыхания птиц. В отличие от современных рептилий и млекопитающих, легкие птиц снабжены дополнительными воздушными мешками, что делает дыхание очень эффективным, и вот почему: млекопитающие (и все другие нептицы) вдыхают воздух в легкие и выдыхают из них, и в этом — весь цикл вдоха-выдоха. У птиц все происходит по более расширенной схеме.

Когда птица делает вдох, воздух сначала поступает в систему воздушных мешков, затем проходит собственно в легкие, но не через трахею, а через проход из воздушного мешка, и при выдохе покидает легкие. Односторонний проход воздуха через легочные мембраны позволяет решить проблему движения разнонаправленных потоков: воздух идет в одном направлении, кровь в сосудах, проходящих через легкие, — в другую. По сравнению с легкими, в которых лишь один путь для поступления воздуха и последующего выдоха, такая сквозная система, как у птиц, намного более результативна для поглощения кислорода и освобождения от углекислого газа.

Птиц вскрывали и анализировали их анатомию в течение многих веков, поэтому странным кажется то, что полное понимание системы воздушных мешков сложилось лишь к 2005 году. Два специалиста по птицам, Патрик О'Коннор и Леон Клэссенс, вводили в дыхательную систему различных птиц значительное количество быстро густеющего вещества, а затем аккуратно вскрывали тела и описывали состояние заполненных полостей — воздушных мешков^[194]. К их удивлению обнаружилось, что птичьи воздушные мешки намного более вместительны и сложны по своему устройству, чем предполагалось. Впервые стала по-настоящему ясна связь воздушных мешков и воздухоносной кости (это кость с большой полостью внутри). Упомянутые авторы в том же эксперименте сравнили строение воздухоносных костей птиц и динозавров. Сходство было поразительным — совпадали формы отверстий в гомологичных костях.

Те, кто утверждают, что у динозавров не было системы воздушных мешков, не отрицают при этом, что в костях динозавров существовали полости, но с одной оговоркой: полые кости были нужны для большей легкости тела. Якобы сходство костей динозавров и птиц — это совпадение. Но уж слишком невероятное совпадение.

Очевидно, что общий объем воздушных мешков существенно больше объема легких. Воздушные мешки не принимают непосредственного участия в проникновении кислорода в органы, они являются приспособлением для работы разнонаправленных потоков. Становится понятно, что в сравнении с другими типами легких у позвоночных животных более продуктивная работа дыхательной системы птиц связана с наличием воздушных мешков, которые обеспечивают эффективную работу так называемого двойного дыхания.

Наличие воздушных мешков у динозавров было подтверждено к 2005 году многочисленными исследованиями. До этого момента некоторые ученые доказывали, что

легкие динозавров ничем не отличались от легких современных крокодилов, только были больше, и что птичьи легкие с дополнительными воздушными мешками^[195], а также система двойного дыхания не существовали до мелового периода, то есть появились не ранее 100 миллионов лет назад — и только у птиц! Данная точка зрения не представляется убедительной. В 2005 году, впрочем, наука еще не располагала точными сведениями о концентрациях кислорода в атмосфере в раннем мезозое, а также оставалось неизвестным, каким образом изменения уровня кислорода могут влиять на эволюцию дыхательных систем.

Как бы то ни было, дыхательная система птиц устроена намного лучше, чем у млекопитающих. Было подсчитано, что на высоте уровня моря птица извлекает из воздуха на 33 % больше кислорода, чем млекопитающее, и эта разница может увеличиваться — на высоте 4500 м дыхание птиц может быть на 200 % эффективнее, чем у млекопитающих. Это дает птицам огромное преимущество перед рептилиями и млекопитающими. Если подобная ситуация существовала и в прошлом, когда даже на уровне моря концентрация кислорода в атмосфере равнялась примерно тому, что сегодня наблюдается на высоте 4500 м, то, разумеется, преимущества подобной системы дыхания невозможно было переоценить.

Птицы произошли от небольшой группы двуногих динозавров — ящеротазовых. Скелеты первых птиц обнаружены в отложениях юрского периода, при этом нет единого мнения о том, насколько те древние виды, например, знаменитый археоптерикс, были «птицами». Мы еще вернемся к этому вопросу. Следует учесть, что воздушные мешки состоят из мягких тканей, а потому могут образовывать окаменелости лишь при особых обстоятельствах. Таким образом, у нас нет точных данных о том, когда впервые появились воздушные мешки. Однако косвенные свидетельства имеются, и их достаточно, чтобы убедиться в наличии у всех первых ящеротазовых системы воздушных мешков, подобных тем, что есть у современных птиц. И, как современные птицы, ящеротазовые динозавры были теплокровными. Доказательства этим фактам пришли к нам благодаря изучению костных полостей — именно там воздушные мешки могли находиться. Смелую гипотезу, что у динозавров существовала система воздушных мешков, схожая с птичьей, первым выдвинул Роберт Беккер. С конца XIX века было известно, что кости некоторых динозавров, подобно птичьим, имеют любопытные полости. Десятилетиями этот факт объясняли необходимостью облегчить вес массивных костей, либо о нем просто забывали. Описываемые кости, впоследствии названные воздухоносными, принадлежали самым крупным животным всех времен — зауроподам юрского и мелового периодов, а потому идея облегчения костей казалась наиболее вероятной. Такие воздухоносные кости в основном относились к позвонковым. У птиц имеются такие же воздухоносные позвонки, и хотя без сомнений можно утверждать, что полые кости птиц облегчают их вес и позволяют летать, также очевидно, что некоторые воздушные мешки, соединенные с легкими птиц, располагаются в костях. Получается, что пустоты в костях являются местом, куда можно упрятать воздушные мешки, которые иначе занимали бы очень много внутреннего пространства, необходимого для других полезных органов. Что ж, весьма разумный эволюционный ход. Беккер сделал еще шаг и предположил, что воздухоносные кости его любимых ископаемых зауроподов служили той же цели, а значит, у зауроподов также имелись воздушные мешки. Этим Беккер в перспективе хотел доказать, что динозавры были теплокровными и что наличие воздушных мешков было не просто адаптацией к условиям нехватки кислорода. В связи с полетами птицы тратят огромное количество энергии и им необходимо много кислорода, поэтому предполагалось, что система воздушных мешков возникла как способ удовлетворить потребности метаболизма этих теплокровных существ.

Вслед за Беккером другие исследователи динозавров подхватили идею, и в 2003 году

палеонтолог Мэтт Ведел представил работу о наличии воздушных мешков у зауроподов. Приблизительно в то же время другой специалист по динозаврам Грег Пол опубликовал похожие данные в отношении двуногих видов. В 2002 году Грег Пол высказал предположение, что воздушные мешки имелись также у первых из так называемых архозавров — примитивных рептилий позднего пермского и раннего триасового периодов (в этой книге мы называем их архозавроморфами), от которых потом произошли крокодилы, динозавры и птицы. Некоторые животные этой древней группы, в которую входят четвероногие протерозухи (выше мы о них упоминали как о первых архозаврах триаса), имели складчатые легкие. Вдох, возможно, производился с дополнительной помощью примитивного брюшного насоса (даже более примитивного, чем у современных крокодилов). Но в тот момент, когда Грег Пол написал свою статью, еще не было известно, что крокодилы и их предки располагали намного более развитой дыхательной системой, благодаря тому, что вдох и выдох не сталкиваются друг с другом в одном и том же канале.

Реалистичные представления о системе дыхания крокодилов сформировались не ранее 2010 года и, конечно, повлияли на наше видение эволюционного прогресса и крокодилов, и динозавров, и млекопитающих. Оказывается, «дыхалка» у триасовых рептилий была намного лучше, чем у млекопитающих.

От архозавроморфов эволюция системы воздушных мешков могла быстро развиться у всех их потомков, однако у крокодилов (к несчастью для них) ни воздухоносные кости, ни воздушные мешки так и не появились.

Ко времени, когда в среднем триасе появляются первые настоящие динозавры, система воздушных мешков распространилась лишь частично. У самых примитивных тероподов того времени воздухоносных костей не было. Возможно, легкие стали неэластичными и относительно меньшего размера — это признаки легкого сегодняшних птиц. В юрском периоде, когда появились, например, аллозавры, система воздушных мешков уже была полностью сформирована, хотя и сильно отличалась от современного строения у птиц. Тем не менее вся система выглядела так, будто ее обладатели умели летать (даже нелетающие птицы современности произошли от древних «летунов»), присутствовали большие грудные и брюшные воздушные мешки.

В середине юрского периода, когда появился археоптерикс, у динозавров существовало большое разнообразие типов дыхания, как с воздухоносными костями, так и без них. Также, возможно, имела место и параллельная эволюция. Например, воздухоносные кости у зауроподов могли образоваться одновременно и независимо от эволюции схожих признаков у двуногих ящеротазовых.

Завершая разговор о воздушных мешках, заметим: хотя для ящеротазовых они были обычным признаком, все еще не обнаружено доказательств того, что они существовали у другой большой группы динозавров — птицетазовых, включая утконосов, игуанодонов и рогатых цератопсов, все три группы этих животных принадлежат меловому периоду, а не юрскому, и, по-видимому, не случайно. Наличие/отсутствие системы воздушных мешков соотносимо с их появлением в геологических периодах. В юрском периоде кислород был в дефиците, и животные без воздушных мешков также были немногочисленны. Птицетазовые лишь в позднем юрском периоде и на протяжении мелового периода, во времена значительного повышения уровня кислорода, стали более распространенными.

Возможно, древнейшие динозавры ходили в чем-то на львов — двадцать часов в сутки спали, чтобы накопить энергию, что было необходимо в условиях недостатка кислорода, но на охоте проявляли чрезвычайную активность, большую, чем их конкуренты — предки крокодилов, цинодонты и первые млекопитающие. Динозаврам нужно было совсем

немного — быть чуть лучше других. И они были.

Метаболические системы в древности, возможно, были более разнообразными, чем современное разграничение всего на две основные группы: холоднокровных и теплокровных. Хотя современные птицы, рептилии и млекопитающие могут относиться к одной из этих двух категорий, существуют тем не менее различные организмы, которые могут вырабатывать тепло в своих телах без внешнего источника тепловой энергии. Например, крупные насекомые, некоторые рыбы, большие змеи и ящерицы. Таких существ можно считать теплокровными, но не в том же смысле, что млекопитающих и птиц. Среди большого разнообразия динозавров, вероятно, существовало и большее разнообразие типов метаболизма.

Динозавры были не единственными обитателями юрского периода, наши предки, например, тоже в нем жили, хотя и были очень небольшими по размеру. Существовали другие сухопутные и морские животные, включая черепах, плезиозавров и крокодилов. Впрочем, динозавры главенствовали. На первый взгляд может показаться, что у динозавров имелось бесчисленное множество типов строения тела, на самом деле — всего три. Все три обладали общей чертой, которая роднит их с морфологией птиц и млекопитающих: туловища приподняты над землей, конечности находятся под корпусом. Три морфологических типа динозавров таковы: двуногие, короткошеие четвероногие и длинношеие четвероногие. Каждая из трех групп сформировалась в свое время и имела свой период процветания и максимального распространения. По порядку следования и степени определенности признаков мы выделяем следующие пять наиболее очевидных для нас «морфотипов» (типов строения тела) динозавров.

1. *Поздний триас*. Появились самые первые динозавры в последней трети триасового периода, но в первые 15 млн лет своего существования не отличались особым разнообразием. Большинство форм были двуногими хищными ящеротазовыми животными. К концу данного периода возникли четвероногие ящеротазовые (зауроподы). Птицетазовые отделились от ящеротазовых в самом конце триаса и составляли совсем небольшой процент от всех видов динозавров, а также в общей численности. В триасовом периоде размеры динозавров невелики, от одного до трех метров, первые птицетазовые (например, пизанозавр) были двуногими животными не более метра в длину, и у них развился новый тип челюсти, приспособленный к поеданию растений. Уже на самом исходе триаса происходит первый реальный скачок в распространении динозавров, это касается в первую очередь ящеротазовых, которые стали и более крупными, и более многочисленными хищниками. Также впервые проявился гигантизм у зауроподов — это, например, были платезавры позднего триасового периода.

2. *Первая половина юрского периода*. Господствующими видами стали ящеротазовые двуногие и длинношеие четвероногие. В течение этого периода число и размеры птицетазовых оставались небольшими, тем не менее развилось большое разнообразие их видовых форм, которые в меловом периоде стали доминирующими среди динозавров. К этим формам птицетазовых относились четвероногие животные с панцирными пластинами, например, тиреофоры, а также первые стегозавры, появившиеся в середине периода. Юрский период также характеризуется развитием других групп животных — без защитных пластин: орнитоподов — гипсилофодонтид, игуанодонтов, утконосных, маргиноцефалов — цератопсов (они появились только в меловом периоде) и пахицефалозаврид. Однако самыми многочисленными все же были зауроподы. В позднем триасе они разделились на две группы — прозауроподы и настоящие зауроподы. Первые характеризовались большим разнообразием видов в первой половине триаса, но во второй трети данного периода вымерли, и в позднем

триасе можно наблюдать большую радиацию настоящих зауроподов.

Двуногие ящеротазовые также демонстрировали большое разнообразие и успешное развитие в первой половине юрского периода. На исходе триасового периода данная группа разделилась на две — цератозавров и тетануров. Цератозавры были распространены в раннем юрском периоде, но в середине юры уступили первенство тетанурам. В дальнейшем эта последняя группа породила самого знаменитого из всех динозавров — тираннозавра, обитавшего во времена позднего мелового периода. Следует отметить, что прочие представители группы были значительно меньше своего известного сородича. Наиболее значительным достижением эволюции в юрский период стало появление организмов, от которых потом произошли птицы.

3. *Поздний юрский период.* Время гигантов. Останки крупнейших зауроподов находят в отложениях именно этого периода, господство этих форм продолжалось до середины мела. Моде на гигантизм также следовали и ящеротазовые хищники, например, типичные для тех времен аллозавры. Таким образом, самым ярким признаком поздней юры являются намного более крупные размеры, чем у животных раннего и среднего этапов данного периода. И это касается не только ящеротазовых. Защищенные панцирем птицетазовые в тот период также заметно выросли, особенно стегозавры. Разнообразие птицетазовых того времени — стегозавров, анкилозавров, нодозавров, камптозавров и гипсилофодонтид — очень изменило общий вид всего сообщества динозавров.

4. *Первая половина мелового периода.* Хотя в самом начале данного временного интервала господство по-прежнему сохранялось за зауроподами, ближе к середине мела произошел серьезный сдвиг: увеличились разнообразие и численность птицетазовых, и в конце концов они превзошли ящеротазовых по количеству. С конца юрского периода зауроподы вымирали и в меловом периоде становились все более редкими.

5. *Поздний меловой период.* Бурно развиваются многочисленные виды динозавров. В основном это происходит за счет появления большого числа новых видов птицетазовых: цератопсов, гадрозавров, анкилозавров и других. Зауроподы представлены совсем небольшим числом.

Этапы эволюции никогда не связаны с каким-либо одним фактором. Морфология динозавров менялась в процессе развития отношений «хищник — жертва», борьбы за выживание внутри таксономических групп и между группами. Климатические изменения, возможно, играли весьма значительную роль в эволюции тех времен: невероятно резкие подъемы и понижения уровня моря в юрском и меловом периодах. Однажды подъем уровня моря был настолько сильным, что.

Северная Америка превратилась в два малых континента, разделенных большим, хотя и мелководным морем, протянувшимся с севера на юг. Впрочем, и уровень кислорода стал не последним фактором эволюционного развития.

Поздний триас, когда стали появляться первые динозавры, был временем низкого уровня кислорода, что сопровождалось еще и высокими концентрациями углекислого газа в атмосфере — именно это, а не падение астероида, стало причиной триасово-юрского массового вымирания. Комбинация этих факторов — низкий уровень кислорода и высокие мировые температуры — сыграла роль «киллера». Исследования окаменелостей, образовавшихся до и после данного вымирания, впрочем, показывают, что ящеротазовые в отличие от прочих групп позвоночных, серьезно пострадавших тогда, сумели довольно спокойно пережить этот неблагоприятный период. Причина тому — более совершенная система дыхания, снабженная воздушными мешками, что дало ящеротазовым преимущество в борьбе за выживание.

Птицетазовые динозавры, с другой стороны, не обладали такой усовершенствованной дыхательной системой, как ящеротазовые. Тем не менее они превосходили травоядных ящеротазовых в выживаемости, поскольку отличались большей ловкостью в добывании пищи, головы у них были крупнее, зубы и челюсти — мощнее. В меловом периоде, когда концентрация кислорода в атмосфере достигла почти современного уровня, птицетазовые стали господствующей группой травоядных, что привело к постепенному вымиранию ящеротазовых травоядных, вытесненных птицетазовыми в борьбе за выживание.

Наряду со значительным повышением уровня атмосферного кислорода в юрском и меловом периодах произошли и другие важные события. Одним из них стал распад единого континента Пангея на несколько континентов. Кроме того, произошло коренное изменение флоры на планете, что, возможно, оказало еще большее воздействие на развитие и распространение животных.

Эволюция динозавров протекала в основном в мире, где царствовали голосеменные, а также были распространены папоротники, саговники и гинкго. Однако в первой половине мелового периода возникла новая группа растений — цветковые. Обладая новым способом размножения и прочими адаптивными свойствами, данная группа растений — покрытосеменные — показала быструю видовую радиацию. Представители ее повсеместно на Земле превзошли по численности все прочие более ранние формы растений. Их численность росла так быстро, что к концу мелового периода, около 65 млн лет назад, они составляли 90 % всей растительности. Подобная перемена в типе пищи могла существенным образом повлиять на травоядных, а это, в свою очередь, привело и к изменениям в строении хищников. Чтобы убить зауропода в позднем юрском периоде, нужно было применить совершенно другие приспособления и методы по сравнению с охотой на гадрозавра в конце мелового периода.

Поедание растений напрямую зависит от строения зубов: для определенных растений — соответствующие зубы. Зауроподы, возможно, питались хвойными иглами, их огромные бочкообразные тела были в основном предназначены для ферментации и переваривания субстанций, которые вообще-то переварить было относительно трудно. Возникновение растений с широкими листьями, покрытосеменных, предполагало и появление другого типа зубов, с иным типом кусающих поверхностей, не таких, которые требовались для поедания сосновых иголок. Поэтому переход господства от зауроподов юры к птицетазовым мела можно объяснить изменениями в царстве растений. Различия в принципах дыхания также сыграли свою роль, поскольку, если бы уровень кислорода не увеличился на 15 %, птицетазовые так и не стали бы господствующей группой.

Легкие динозавров и эволюция птиц

Мы полагаем, что первые динозавры были таким типом существ, который ни до их появления, ни после — в наши дни — не встречался и не встречается. Вертикальная — полностью поднятая над землей — ориентация тела и система воздушных мешков сделали их тип дыхания самым совершенным из всех донные существующих. Соотношение количества кислорода, извлекаемого из воздуха за определенное время, и энергии, затрачиваемой на дыхание, наиболее оптимально из всех известных вариантов. Тем не менее эти древние организмы утратили теплокровность, променяв ее, возможно, на более пассивный способ — инерциальную гомойотермию: высокая температура тела обеспечивается исключительно за счет поступления тепла извне, при этом сохраняется типично рептилийный уровень метаболизма. Такова была уловка: инерциальная гомойотермия — для меньшего потребления кислорода в состоянии покоя, и усовершенствованная система легких — для активного передвижения (чтобы избежать быстрого, а потому токсичного кислородного истощения). Сегодня известно, что птицы, которые впервые появились в юрском периоде как группа динозавров, были теплокровными и имели отличное от современных рептилий строение легкого.

Птицеподобные рептилии и рептилиеобразные птицы

Если не считать тираннозавров, то из всех динозавров самыми популярными возмутителями спокойствия общественности и исследователей в последнее время являются птицы, а именно их самые первые формы. Ученые яростно дискутируют на предмет того, чем были покрыты их тела, а самое главное — когда состоялся первый полет и... зачем.

Первые птицы появились примерно 150 млн лет назад, самая известная из них — археоптерикс.

Только-только начался юрский период, уровень кислорода к тому моменту увеличивался уже 50 млн лет, среди динозавров был распространен гигантизм. Непосредственными предками птиц были очень быстро бегающие динозавры, которые, вероятно, использовали свои передние конечности для хватания жертв, то есть это было движение, напоминающее взмах, — такое предположение, по крайней мере, делает палеонтолог из Беркли Кевин Падиан. Ископаемые свидетельствуют о том, что предки птиц были ящеротазовыми двуногими хищниками — троодонтидами или, возможно, дромеозавридами, которые, по всей вероятности, уже были пернатыми.

Умел ли археоптерикс летать? Многие специалисты считают, что умел, но есть разногласия относительно времени первого полета. Могло ли это произойти во времена позднего юрского периода, когда первым «птицам» серьезную конкуренцию в воздухе составляли разнообразные и хорошо приспособленные к условиям полета птеродактили? Палеонтологическая летопись показывает, что ко времени раннего мела уже существовали формы, подобные птицам, у которых развилось «крылышко», как придаточное крыло современных птиц на переднем крае основного крыла, основой которого является «большой палец». Это приспособление позволяло совершать медленные перелеты и при этом хорошо маневрировать. Таким образом, всего через несколько миллионов лет после появления археоптерикса у протоптиц развилась вполне сносная способность летать. Исследования недавних лет, проведенные в Китае, открыли неожиданное для всех разнообразие птиц уже в раннем меловом периоде. Полет стал качеством, ускорившим эволюцию новых форм. Впрочем, поскольку настоящая история птиц началась после юрского периода, мы вернемся к ним в другой главе нашей книги.

Птичий полет требует очень много энергии, и это, в совокупности с теплокровностью, делает их чрезвычайно активными потребителями кислорода. Птицам система воздушных мешков жизненно необходима.

Размножение динозавров и кислород

Одной из величайших палеонтологических находок первой половины XX века стали яйца динозавра^[196]. Во второй половине XX века в окаменелостях яиц были найдены комплексные паттерны, указывающие на сложное поведение динозавров в размножении. Уже в XXI веке применение высокотехнологичных инструментов помогло совершить еще одну маленькую революцию в понимании размножения динозавров. Теперь яйца можно изучать без механических повреждений, например, сканированием, и исследовать останки эмбрионов в них. Сегодня мы намного лучше осведомлены не только об этапах и особенностях роста зародышей динозавров, но и о структуре самих яиц — что там у них к чему.

Размножение птиц по крайней мере в одном из аспектов не отличается большой вариативностью — все современные птицы откладывают яйца с твердой пористой скорлупой. А ведь птицы — живой путь к изучению динозавров! У сегодняшних птиц нет живорождения, в отличие от современных рептилий, среди которых многие группы отличаются таким способом размножения. Кроме того, существует большое различие в строении яиц пернатых и яиц пресмыкающихся. Яичная скорлупа и у птиц, и у рептилий состоит из внутренней мембраны и внешней более твердой оболочки-скорлупы, и как раз состав скорлупы сильно варьируется. У птиц скорлупа более толстая и состоит из карбоната кальция, а у рептилий внешняя оболочка яйца часто почти не содержит карбонат кальция и потому является кожистой и эластичной. Различается и минералогический состав скорлупы: у птиц, крокодилов и ящериц это в основном кальцит, а у черепах — арагонит (минерал из группы карбонатов). Таким образом, яйца по их строению и особенностям можно разделить на две группы: с твердой скорлупой и с мягкой, кожистой. Некоторые специалисты продолжают эту классификацию и делят последнюю группу кожистых яиц еще на две: с эластичной скорлупой (у некоторых черепах и ящериц) и собственно мягкой (у некоторых змей и ящериц). Ничего удивительного, что способность к окаменению у яиц разных групп кардинально различается. Известно множество ископаемых яиц с твердой скорлупой (в основном от динозавров), несколько случаев сохранившихся эластичных кожистых яиц, и совсем не найдено ископаемых яиц с собственно мягкой оболочкой, которые не вызывали бы каких-либо сомнений в своей подлинности.

Большой интерес к динозаврам породил и дискуссию о способах их размножения (очень будоражит воображение соитие здоровенных сейсмозавров, например), и вопрос этот по-прежнему во многом покрыт тайной. Со времен экспедиции в пустыню Гоби в 1920-х годах известно, что динозавры откладывали большие яйца с твердой скорлупой, содержащей кальцит. С тех пор было найдено много яиц динозавров мелового периода, а также исследованы способы гнездования. Открыли научное направление исследований, посвященных размножению динозавров, публикации Джека Хорнера из штата Монтана. Впрочем, нельзя считать, что находки мелового периода отражают характеристики размножения динозавров в целом. Большинство ученых полагают, что все динозавры откладывали яйца с твердой скорлупой, однако этот факт до конца так и не доказан. Существуют косвенные свидетельства тому, что некоторые ранние формы динозавров откладывали, возможно, кожистые яйца или даже являлись живородящими.

Почти все найденные яйца динозавров относятся к меловому периоду, их размеры, число, пористость и химический состав весьма многообразны, но не этим по-настоящему интересны яйца динозавров. Яиц юрского периода найдено в разы меньше, и известны единичные случаи находок яиц триасового периода. Почему так? Связано ли это с

особенностями окаменения в меловом периоде? Как в те времена обстояло дело с образованием ископаемых останков? А может, это связано с разницей в уровнях кислорода в атмосфере в меловом, юрском и триасовом периодах? Особенно это касается позднего мела, в отложениях которого найдено большего всего яиц.

Существует несколько возможных объяснений.

Во-первых, на самом деле могли существовать какие-то особенности окаменения в определенный период, а количество яиц, отложенных динозаврами как в меловом периоде, так и до него, было примерно одинаковым, при этом различие в количестве найденных яиц в разных периодах объясняется тем, что в триасе и юрском периоде вообще сохранилось меньше ископаемых, чем в меловом.

Во-вторых, можно предположить, что сами яйца мелового периода сохранялись лучше, чем в предыдущие периоды. Так действительно могло быть, если яйца триаса и юрского периода были кожистыми, как у сегодняшних рептилий, а не с твердой скорлупой, как у птиц. А если бы некоторые динозавры, как морские обитатели-ихтиозавры, были живородящими, то, разумеется, и яиц в отложениях осталось бы меньше. Возможно, изменения уровней атмосферного кислорода сыграли значительную роль и в способах размножения динозавров, как это произошло со многими другими аспектами развития жизни на нашей планете.

Окаменелости яиц из меловых отложений, приписываемые динозаврам, имеют скорлупу, состоящую из карбоната кальция, как у курицы, только более толстую. Однако, в отличие от гладких куриных яиц, яйца динозавров обычно имеют продольные борозды или наросты-бугорки. Предположительно такие образования на скорлупе позволяли яйцам сохраниться при падении из тела самки в материал, где их потом закапывали. Умение закапывать яйца способствовало и лучшему их сохранению впоследствии в отложениях. Кроме того, твердая скорлупа позволяла яйцам выдержать давление земли или песка, куда их закапывали.

Сегодня также хорошо изучены особенности гнездования динозавров и расположение яиц в гнездах, которые представляли собой насыпи, но все эти сведения относятся только к меловому периоду, никак не ранее. Двуногий динозавр троодон из позднего мелового периода, например, выкладывал свои яйца парами и плотно подгонял их друг к другу. Джек Хорнер описывает разнообразные способы закапывания и укладки яиц в гнездах гадрозавров позднего мела.

Преимущества яиц с твердой скорлупой еще и в том, что хищникам сложнее их разгрызть. Кроме того, по мере развития зародыша часть карбоната кальция растворяется во внутренней среде яйца и идет на строительство костей малыша. Скорлупа также защищает от проникновения инфекции. Все эти бонусы, конечно, имеют свою цену. Карбонат кальция, даже если скорлупа тонкая, препятствует свободному проникновению воздуха и воды как к зародышу, так и наружу. А ведь развивающееся существо нуждается и в том, и в другом. У всех яиц есть в скорлупе поры, обеспечивающие доступ насыщенного кислородом воздуха, но сквозь них довольно быстро испаряется вода. Чтобы обеспечить зародышу необходимый запас воды, во внутренней среде яйца содержится много вещества под названием альбумин (привычный для нас «белок»). Такой тип яйца присущ всем птицам и крокодилам.

Другой тип яйца — кожистое — откладывают черепахи и большинство ящериц. В такие яйца вода может проникать извне, и тогда они увеличиваются в размерах. Однако вода из кожистых яиц так же легко уходит. Поэтому многие черепахи и аллигаторы закапывают свои яйца — чтобы сохранить в них воду, а также уберечь от хищников.

Закапывание яиц имеет и минусы. Все развивающиеся зародыши нуждаются в кислороде, поэтому скорлупа должна пропускать воздух, и если яйцо закопано слишком глубоко или в слишком плотную почву, зародыш задохнется. Если яйца отложены на больших высотах над

уровнем моря, то возникает та же опасность, даже если родители будут усиленно заботиться о кладке. До недавнего времени биологи в основном исследовали влияние температуры на развитие рептилий и птиц. Тем не менее изучение ящериц, обитающих на большой высоте, дает ключ к пониманию роли кислорода в их жизни. Среди современных ящериц, обитающих на больших высотах, есть и живородящие. Кроме того, некоторые из них долгое время удерживают яйца в яйцеводе. Оба явления объясняются тем, что ящерицы стараются сохранить относительно высокую температуру в среде, окружающей яйца, поскольку температура внешней среды может быть довольно низкой, что замедлит развитие. Однако оба этих адаптивных свойства заметно сокращают период, когда эмбрион заключен в капсулу, что само по себе снижает количество получаемого кислорода. Яйца с твердой скорлупой не могут задерживаться внутри материнского организма надолго, поскольку кислород внутрь таких яиц может поступать только после того, как они покинули тело матери.

Итак, вот нерешенный вопрос. У пресмыкающихся имеется четыре способа размножения: живорождение; кожистые яйца, которые задерживаются в теле матери на продолжительные отрезки времени; кожистые яйца, которые самка откладывает вскоре после спаривания; яйца с твердой скорлупой. Кроме того, последующее развитие яиц имеет ряд вариаций: яйца могут быть закопаны или не закопаны, а если их не закапывают, то родители могут либо заботиться о кладке, либо оставляют ее без присмотра. Преимущества каждого из всех перечисленных вариантов, а также время появления каждого из них в истории развития жизни нам не известны.

Нерешенные вопросы на этом не закончились. Большинство обнаруженных яиц динозавров относятся, как было сказано выше, к меловому периоду, в основном к позднему мелу, и они — с твердой карбонатной скорлупой. Появление манеры закапывать яйца также характерно для динозавров того периода. А что же можно сказать о динозаврах более ранних эпох? В то время как в отложениях позднего юрского периода (например, яйца динозавров, обнаруженные в Португалии, которые содержат окаменелости эмбрионов) можно найти яйца зауроподов или двуногих ящеротазовых, в более ранних породах яиц или гнезд динозавров почти не обнаружено. Известно всего несколько случаев останков яиц триасового периода.

Также остается загадкой то, когда именно впервые появились различные типы яиц. В 2005 году была выдвинута гипотеза, что яйца с твердой скорлупой впервые возникли в конце пермского периода как адаптация с целью избежать обезвоживания в климате, становившемся все более сухим в конце перми и на протяжении триаса. К сожалению, ископаемых, которые подтвердили бы эту гипотезу, не найдено.

Науке не известны образцы яиц, о которых с уверенностью можно сказать, что они относятся к пермскому периоду, несмотря на то что в отложениях именно того времени обнаружены ископаемые анапсид (предков черепах), диапсид (предков крокодилов и динозавров) и синапсид (предков млекопитающих). Более того, лишь о небольшом количестве яиц из позднего триаса известно, что они точно относятся к динозаврам. Возникает странная ситуация: яйца динозавров, обычное явление для отложений мелового периода, не обнаружены в породах того же типа в пермских и триасовых отложениях. Даже если предположить, что архозавры перми и триаса откладывали яйца с твердой скорлупой (что очень маловероятно), мы бы их уже нашли.

Отсутствие реальных данных — всегда очень ненадежная основа для исследования, но иногда на помощь приходят цифры. Абсолютно все образцы свидетельствуют о том, что у сухопутных яйцекладущих животных до мелового периода яиц с твердой скорлупой не было. Даже обнаруженное в 2012 году яйцо динозавра с твердой скорлупой в Южной Африке стало

скорее исключением, подтверждающим правило. Сложно представить, чтобы дальнейшие раскопки, какими бы интенсивными они ни были, как-то повлияли на представления о данной закономерности.

Известны всего две разновидности формы яйца динозавра: шарообразная и вытянутая, однако распознают целых семь различных паттернов расположения частиц скорлупы. Подобное разнообразие строения стенок яйца могло удивить, если бы все динозавры произошли от одного яйцекладущего предка. Однако яйца с твердой скорлупой появились именно как результат эволюции нескольких групп динозавров и в *разное время*. Если сложить число типов строения яйца вымерших животных и существующих сегодня, то получится 12 отдельных типов структур, возникших в различные периоды истории развития жизни, — у рептилий, динозавров и птиц.

Возможно, каждый тип структуры яйца является адаптацией к разным условиям развития определенных групп организмов. Черепахи, например, закапывают свои яйца в глубокие ямы, что создает условия, совершенно не схожие с теми, в которых в гнезде высоко на дереве развивается яйцо малиновки. Впрочем, другим объяснением различий в структурах яиц является то, что каждая группа животных, включая динозавров, имеет свою историю эволюции.

«Идеальный» уровень кислорода

Интереснейшим фактом эволюции жизни является то, что очень многие современные группы сухопутных животных возникли в течение небольшого в геологическом смысле интервала — во времена позднего палеозоя, когда концентрации кислорода в атмосфере превышали современный его уровень. Так произошло со многими современными позвоночными, включая первых представителей семейств, в дальнейшем превратившихся в ящериц, черепах, крокодилов и млекопитающих. Однако не только эволюция сухопутных позвоночных отражает данный факт, но и бурное развитие сухопутных беспозвоночных — насекомых, паукообразных, сухопутных улиток, которое также началось в каменноугольном периоде, более 300 млн лет назад. Результаты экспериментов последних пяти лет показывают, что существует некий «волшебный» уровень кислорода, стимулирующий самый быстрый рост эмбрионов в яйцах сухопутных позвоночных и насекомых. Этот уровень кислорода — 27 % от общего объема газов в атмосфере.

Современный уровень — 21 %. Наблюдения за аллигаторами и насекомыми свидетельствуют, что для наиболее успешного развития зародышей этих организмов оптимальными являются 27 % кислорода в атмосфере. Яйца, которые помещали в инкубаторы с содержанием кислорода либо ниже, либо выше данного уровня, демонстрировали более длительное развитие и более позднее появление детенышей. При уровне кислорода около 10–12 %, как в позднем триасе, многие или даже все яйца вообще не созрели, а если и происходило появление живых детенышей, то после такого долгого периода развития, что в естественных условиях, в живой природе, их просто давно бы съели хищники. Если к данному уравнению добавить еще температурную составляющую, а именно очень высокую температуру, то уровень выживаемости зародышей становится еще ниже, поскольку яйцам необходимы поры для проникновения внутрь кислорода, но чем больше пор, тем быстрее из яйца испаряется вода, что приводит к скорой гибели зародышей. Самым худшим для выживаемости зародышей в яйце можно считать сочетание, когда уровень атмосферного кислорода составляет 10–12 %, температура окружающей среды выше современных показателей, а воздух — намного суше. Такое время нам известно, это — поздний триас. Яйцекладущие существа того периода находились в очень трудном положении.

Проблема в том, что рептилии начали развиваться в мире с относительно высоким уровнем кислорода — карбоне, когда содержание кислорода в атмосфере составляло выше 27 %. Те первые рептилии стали первыми существами, у которых возникли амниотические яйца. Но с падением уровня кислорода и общемировым возрастанием температуры яйца первых пресмыкающихся могли оказаться смертельными ловушками: внутрь яйца поступало недостаточно кислорода, а наружу испарялось слишком много влаги. По-видимому, реакцией на такое изменение условий среды явилось развитие живорождения. Такое направление эволюции могло стать решением проблемы низкого уровня кислорода и жары (которая усугубляла последствия падения концентрации кислорода в атмосфере) в позднем пермском периоде. Несмотря на то что в Южной Африке, России и Южной Америке было найдено множество окаменелостей терапсид, в тех же породах ни разу не были обнаружены ни яйца, ни гнезда. Скорее всего, к тому времени терапсиды уже были живородящими, а в дальнейшем эта характеристика сохранилась и у их потомков — млекопитающих, самые древние останки которых относятся примерно к тому же времени, что и первые ископаемые динозавры. Предположительно многие группы динозавров стали яйцекладущими в позднем юрском периоде в ответ на повышение уровня кислорода. Формирование яиц с твердой скорлупой,

которые потом закапывали, не представлялось возможным в интервале между поздним пермским периодом и до середины юры, поскольку содержание кислорода в атмосфере было очень невелико.

Недостаток кислорода и жаркий климат перми и триаса создали условия для эволюции живорождения, а также развития кожистых яиц — более приспособленных для газообмена, при котором кислород проникает внутрь, а углекислый газ выходит наружу. Позднее, в позднем юрском периоде и на протяжении мела, когда уровень кислорода вырос, а температура оставалась высокой, у динозавров стало возможным появление яиц с твердой кальцитной скорлупой, а также гнезд, в которые эти яйца закапывали.

Характерные особенности метаболизма, а также различные способы размножения — живорождение, откладывание яиц — являются важнейшими биологическими признаками древних организмов и в ближайшем будущем станут основными темами исследований в соответствующих областях знаний. К сожалению, проблема времени происхождения и распространения той или иной стратегии воспроизводства может оказаться неразрешимой, поскольку мы по-прежнему не располагаем ископаемыми образцами кожистых яиц.

Глава 15

Жизнь в океане:

200–65 миллионов лет назад

Мезозойская эра и ее периоды — триасовый, юрский и меловой — привлекают внимание исследователей по той причине, что в те времена появлялись и эволюционировали интереснейшие сухопутные животные, прежде всего динозавры. Однако в те же периоды происходили большие изменения в морских экосистемах. Мезозойский океан в поверхностных водах быстро становился все более похожим на современный, а фауна средних слоев и у дна оставалась совершенно отличной от современных форм. Если сделать срез морских толщ от поверхности до дна, можно проследить эти особенности развития морских обитателей. Давайте нырнем поглубже, чтобы обогатить наше понимание тех процессов, которые происходили в океанах мезозоя — на «парниковой» планете^[197].

Конечно, атмосфера, с которой соприкасался и взаимодействовал океан, сильно влияла на химические и физические аспекты морских экосистем^[198]. Температура атмосферы, изменения температур от полюсов к экватору, химический состав морской воды, включая количество растворенного в ней кислорода, — все эти элементы участвовали в создании особых условий существования морских обитателей. Важным фактом, например, является то, что теплая вода содержит меньше кислорода, чем холодная. В течение всего мезозоя, за исключением последних пяти миллионов лет мела, атмосфера Земли, от полюсов до экватора, была жаркой и влажной. Одна только жара уже служила причиной значительно более низкой, чем в наши дни, концентрации кислорода в Мировом океане. Если к этому обстоятельству также добавить невысокий уровень атмосферного кислорода, то становится понятно, насколько недружелюбными к живым существам были мезозойские океанические воды и насколько сильно они отличались от современных. Неудивительно, что животные, которые пытались выжить в таких условиях, приспосабливались к обитанию в морской воде с низким содержанием кислорода самыми разнообразными способами.

Хотя мезозойский мир значительно отличался от нашего, кое в чем они все же похожи. Подобно тому, как в современном мире невысоко над уровнем моря обитает множество летающих существ — от насекомых до птиц и летучих мышей, небо мезозоя было полно жизни и движения. В небесах летали разнообразные организмы, в том числе насекомые, а также животные двух групп, которых сегодня уже нет: птерозавры (рептилии) и птеродактили. Обитали в мезозое и птицы, их было много, но они совершенно не походили на современных: некоторые — с зубами, а некоторые — без крыльев.

Типичной границей между океаном и сушей в меловой период являлась лагуна. Лагуны образуются, если часть морской воды отделена от основного океана каким-либо рифом. Обычно вода в лагунах теплее, чем в открытом море, и в ней меньше кислорода. Мелководные области мезозойских лагун населяли улитки и двустворчатые моллюски, по форме и таксономическим признакам очень схожие с обитателями современных тропических лагун и прибрежных экосистем.

Например, в мезозое уже существовали роющие двустворчатые моллюски, лопатоногие моллюски, устрицы, гребешки, мидии, каури, моллюски-конусы, моллюски-тритоны, морские улитки, морские ежи (как обитающие на поверхности «правильные», так и «неправильные» роющие, вроде современных плоских морских ежей). Кроме того, в мезозое обитали крабы и

лобстеры. Короче говоря, на морском мелководье в позднем меловом периоде (90–65 млн лет назад) более-менее «современная» фауна уже закрепились, и, по правде говоря, ее относительно мало затронули грандиозные последствия массового вымирания, обозначившего конец мезозойской эры.

Как и сегодня, в более глубоких местах лагун типы животных отличались от обитавших в поверхностных слоях. Такие организмы приспособлялись к проживанию у донных поверхностей, состоящих из осадочных материалов, более мягких, чем песок мелководья. В глубоких местах существовало множество роющих животных, кроме того, там были погребены многие жители из поверхностных вод. Прятаться в органических осадках — одна из основных стратегий выживания, в позднем меловом периоде многие хищники развили у себя способность разгрызать раковины или просверливать их. В лагунах, помимо прочего, находилось много известняка, сформированного рифообразующими организмами, например, кораллами. Островки маленьких рифов позднее превращались в подковообразные структуры, при этом их выгнутая сторона была ориентирована в соответствии с основным направлением ветров.

Дальше от берега располагались большие барьерные рифы, иногда их верхние части выступали из воды. Это были огромные стены из известняка, их протяженность могла достигать десятков тысяч метров. Они вырастали непосредственно у побережий островов или континентов в тех местах, где материковый шельф делал заметный склон и уходил в глубину.

Барьерные рифы служили домом для множества видов рыб, включая костистых рыб, хрящевых акул и скатов.

С внутренней стороны барьерные рифы выглядели во многом абсолютно так же, как их современники, например, Большой барьерный риф в Австралии. Тем не менее есть и серьезное отличие — хотя сегодня рифы населены живыми кораллами, их основной каркас построен не кораллами.

Трехмерные, устойчивые к воздействию волн структуры, которые мы называем рифами, являются важными экосистемами со времен ордовикского периода. Все они были и остаются постройками, в которых принимают участие разнообразные «строители» и «изготовители строительных растворов». Такие структуры схожи с кирпичными домами, «кирпичи» — это кораллы, «штукатурка» — водоросли. Однако лучше сравнить рифы с древними городами: с течением веков там воздвигаются здания, существуют некоторое время, затем разрушаются, а на их руинах вырастают новые. Со временем под тяжестью наслаивающихся построек может осесть даже сама земная поверхность.

Такова природа рифа — веками на уже существующие структуры кораллов надстраиваются новые, поднимаясь все выше к солнцу, стремясь обогнать соседей в настоящей гонке на выживание. Кораллы стараются сделать так, чтобы соперники не разместили свои «кирпичики» сверху на их постройках и не отрезали таким образом путь к свету и открытой проточной воде. Для миллионов одноклеточных растений, которые обитают в каждом полипе, необходимо солнце, а проточная вода приносит плотоядным полипам пищу. Крошечные растения-динофиты помогают кораллам строить их гигантские каркасы, при этом получая от кораллов пищевой ресурс и защиту. Маленькие личинки кораллов находят какую-нибудь твердую неорганическую поверхность и начинают расти к поверхности моря. Если им будет сопутствовать удача, крошечные одинокие личинки разрастутся в колонию из сотен тысяч полипов, которые будут жить сотни и тысячи лет, а их известковый каркас приобретет вес в тысячи тонн. Хотя сегодня существуют тысячелетние колонии кораллов, но рано или поздно такие крупные сообщества погибают, и после этого их

известковый скелет становится строительным фундаментом для следующих поколений кораллов.

Рифы мелового периода проходили те же жизненные этапы и имели те же размеры и очертания, но строительными «кирпичиками» были не кораллы, а моллюски — довольно большие двустворчатые моллюски, совершенно не похожие на современных. Их название — рудисты, они были необычны по форме, многие напоминали конусы, у них имелась верхняя створка-крышечка, которая плотно прилежала к нижней. Некоторые рудисты по своим размерам приближались к тридакнам — гигантским двустворчатым современных тропических морей. В отличие от тридакны, одиночного организма, рудисты росли бок о бок, образуя скопления (как современные мидии), пытаясь занять каждый сантиметр свободной поверхности, росли даже друг на друге.

Каждый большой конус — нижняя створка рудистов — плотно примыкал к соседним, и вместе они представляли собой твердую дорожку примерно 50–60 см в длину и около 30 см в ширину. Сверху на каждом проживал как раз «строитель»-моллюск, которые стремились забраться как можно выше — поближе к свету. Как и кораллы, рудисты проживали в симбиозе с крошечными организмами — одноклеточными растениями, нуждавшимися в свете для фотосинтеза. В свою очередь, растения обеспечивали рудистов необходимым количеством кислорода, а также помогали избавиться от накапливаемых органических остатков и избытка углекислого газа. Современным кораллам требуются столетия, чтобы обрести большие размеры, а те древние двустворчатые росли очень быстро. Через год после закрепления на поверхности морского мелководья (чтобы выжить, они, по всей вероятности, нуждались в большом количестве света, поскольку на их телах располагались микроскопические растения) молодые моллюски образовывали известковые раковины внушительных размеров. Они быстро размножались, быстро росли и довольно скоро погибали, а на их твердых останках появлялись раковины их потомков, и вся колония превращалась в огромный жилой комплекс. Коралловый скелет из одиночного полипа в колонию всего в несколько метров высотой и шириной вырастает за века, а рудистам для этого было достаточно пяти лет.

Рифы, образованные рудистами, как и все рифы, росли вверх, к свету. С внешней стороны рифов, обращенных к открытому морю, дно резко уходило в глубину, и дальше на просторах мезозойского океана, у поверхности и у дна, обитали совсем иные существа, которых сегодня уже не встретишь.

Поверхностные слои океанов тех времен патрулировали большие акулы и гигантские рептилии, вернувшиеся к морскому образу жизни. В группы последних входили короткошеие и длинношеие плезиозавры, а также похожие на ящериц мозазавры. Возможно, их образ жизни очень походил на образ жизни современных тюленей: ныряли за пищей, но поднимались на поверхность за воздухом. Впрочем, они были значительно крупнее тюленей, даже намного крупнее любого известного животного, которое поднимается к поверхности для дыхания, отдыха и спаривания.

Жизнь на глубине океанов, существовавших во времена парникового эффекта, также отличалась почти от всего, что мы знаем о современных морях. Только Черное море сегодня частично схоже по своим условиям с тем, что происходило у дна и даже в средних слоях океанов древних парниковых времен. Это была среда с очень теплой водой и настолько малым количеством кислорода, что многие рыбы не могли там жить. Дно состояло из черной грязи, как донные области Черного моря. Грязь удерживала большие объемы легких частиц органического происхождения черного цвета. На глубине кислорода было так мало, что даже разложение органических остатков проходило гораздо медленнее, чем в условиях насыщенных кислородом придонных вод. В верхних слоях (всего несколько сантиметров)

этого грязевого дна обитали микроорганизмы, чья жизнедеятельность требовала серу, в результате их специфического дыхания выделялись сероводород и метан.

Лишь в немногих местах мезозойского океана существовали придонные экосистемы, которые могли поддерживать жизнь организмов, нуждающихся в нормальных концентрациях кислорода^[199]. В других же частях «парниковых» морей развивались две различные группы моллюсков, приспособленные именно к малому количеству кислорода. Одна группа — двустворчатые моллюски — проживала на дне. Представители другой группы, состоявшей из большого количества видов головоногих моллюсков, или аммонитов, обитали в толще воды, хотя питались у дна.

Головоногие океана в меловом периоде принадлежали к организмам, которые впервые появились на самом раннем этапе юрского периода. Их внезапное возникновение в отложениях тех времен говорит о том, что опустошительное триасово-юрское массовое вымирание, которое произошло за 130 млн лет до начала позднего мела, дало возможность эволюционировать совершенно новому типу животных, включая аммонитов с новым строением. Обнаружение их окаменелостей является одним из приятных моментов поисковой работы палеонтологов, а поскольку мы оба два последних десятилетия провели в охоте за останками аммонитов, то это даже порой вносило некоторую напряженность в наши дружеские отношения. Уорд бывает просто очарован любым намеком на окаменелости аммонитов в породах, а Киршвинк готов просверлить насквозь земную кору ради подходящего музейного образца.

Животные группы головоногих, появившиеся в раннем юрском периоде и обитавшие в «парниковом» океане, важны не только для истории развития жизни, но и для геологической науки, в том числе для использования окаменелостей с целью датировки. В мире есть множество мест, где на морские отложения позднего триаса наслаиваются породы, сформированные в юре. В таких местах можно путешествовать во времени, а если слои достаточно велики, есть шанс проследить многие драматические события позднего триасового и раннего юрского периодов. Данные породы отражают одно из пяти крупнейших массовых вымираний — триасово-юрское. По мере погружения в верхние слои триасовых отложений вы сначала наталкиваетесь на окаменелости двустворчатых рода *Halobia*, а в более молодых породах встречаетесь с многочисленными представителями рода *Monotis*. Но потом двустворчатые исчезают, оставляя необитаемыми несколько метров породы и времени — это позднейший этап триаса, около 3 млн лет, известный как рэтский ярус.

Затем, через несколько метров этого безжизненного вертикального пространства пород, неожиданно появляется новая группа — аммониты. Хотя в отложениях позднего триаса и встречаются аммониты, но они весьма немногочисленны. Зато уже в самом раннем ярусе юрского периода (в Лайм Регис в Англии, в южной Германии и других местах, знаменитых своими аммонитами) эти организмы находятся в огромном количестве, и в слое глубиной всего лишь несколько метров наблюдается их большое разнообразие. Это вам не триас, где один вид это всё, что вы найдете. Аммониты раннего юрского периода разнообразны и многочисленны, а это значит, что к тому моменту закончилось, наконец, падение уровня кислорода, и концентрация этого газа в земных средах снова стала увеличиваться. Однако аммониты вовсе не свидетельствуют о наличии уровня кислорода, равного современному. Эти существа появились в связи с тем, что в водах океана у поверхности кислорода стало чуть-чуть больше, вот они и воспользовались преимуществом. Им это удалось, так как они, возможно, — одни из тех животных, что лучше всего на Земле приспособлены к малому содержанию кислорода в окружающей среде и потому укрепили свои позиции во времена

парникового эффекта юрского и мелового периодов.

Раковины наутилоидов и аммонитов имеют много общего, а потому мы заключаем, что образ жизни у них также мог быть схожим. Наутилусы сегодня обитают в водах, богато насыщенных кислородом, но при этом время от времени встречаются и в придонных областях морей, где кислорода не так уж много. Любопытно, что среди головоногих, известных тем, что им необходима большая концентрация кислорода в средах обитания, тем не менее существует одна группа, непохожая в этом отношении на остальных, — это имеющий раковину наутилус. Он очень устойчив к переменах среды и может от 10 до 15 минут не выказывать дискомфорта, если его вытащить из воды. В воде они поглощают кислород с помощью относительно большой и мощной помпы-сифона, пропускающей сквозь жабры большое количество воды, тем самым обеспечивая большой приток кислорода даже в воде с малой концентрацией кислорода. Если уж какой-либо организм и мог приспособиться к малому количеству кислорода в воде, то это наутилус, что, в частности, было убедительно доказано британским зоологом Мартином Уэллсом, измерившим потребление кислорода у различных наутилусов в Новой Гвинее. Когда наутилус попадает в среду с малым содержанием кислорода, происходят две вещи: во-первых, у него замедляется метаболизм, а во-вторых, его удивительные плавательные способности позволяют ему проплывать большие расстояния в поисках не только пищи, но и мест, где кислорода будет больше.

Появление множества аммонитов в нижних ярусах юры показывает, что эти организмы были прекрасно приспособлены к поглощению максимума кислорода из воды с минимальной концентрацией этого драгоценного газа. Об этой замечательной способности свидетельствует и разнообразие их форм в юрском и меловом периодах, хотя впервые хорошо приспособленное к недостатку кислорода строение их тел могло появиться на границе триаса и юры. По сравнению с морфологией аммонитов, живших до триасово-юрского массового вымирания, тела новых организмов имели значительно большую, чем фрагмакон, жилую камеру, поэтому у них были более тонкие стенки раковин с усложненными швами. Швы также позволяли моллюску быстрее избавляться от жидкости, накопившейся в раковине, чтобы увеличить скорость и маневренность передвижения. Внутри жилой камеры располагался сам моллюск, который мог спрятаться глубоко в раковину. Кроме того, жабры у новых аммонитов были более удлиненные, чем у их предков.

Нам не известно, сколько жабр было у аммонитов — две (как у современных креветок или осьминогов) или четыре (как у современных наутилусов). Большинство сохранившихся раковин раннего юрского периода также показывают, что эти животные не были хорошими пловцами. По всей вероятности, они плавали медленно у поверхности или на поверхности воды, используя свою наполненную воздухом раковину как дирижабль.

В течение юрского периода аммониты изменились незначительно, но в меловом у них произошли большие изменения в строении раковин, которые становились все более и более замысловатыми. Первоначальные формы, ориентированные, как у наутилусов, в одной плоскости, сохранились в меловом периоде, однако появилось и множество новых. Предлагаем вновь нырнуть в океан позднего мелового периода, на этот раз вместе с аммонитами.

Независимо от формы, большинство аммонитов искали на дне ракообразных и другую мелкую добычу. В одной экосистеме могло сосуществовать до дюжины различных групп аммонитов, каждая — со своей формой раковины. Некоторые были совсем маленькими, не более 2,5 см в диаметре, диаметр других достигал 15 см. Большинство раковин аммонитов имели толстые, замысловато расставленные ребра и шипы разного вида, которые могли

служить защитой в мире, полном хищников, обладавших приспособлениями для разгрызания раковин. Такие защитные механизмы вполне могут объяснить процветание аммонитов в «парниковом» океане мелового периода. Вероятно, их основными врагами были плезиозавры и мозазавры.

Аммониты выглядели как кальмары, которых засунули в раковину наутилуса. Сегодня наутилусы имеют 90 щупалец, тогда как у аммонитов было восемь или десять. Наутилусы — падальщики, а современные кальмары и аммониты мезозоя — хищники, которым для питания нужны живые жертвы.

Другой группой моллюсков в океанах «парникового» периода были двустворчатые, не такие странные, как рудисты, но определенно отличные от всех ныне живущих форм. Мы говорим об иноцерамах (род *Inoceramus*). Родственники устриц, они составляли большую группу с разнообразным видовым составом и населяли грязевое дно древних морей. Ни один не был роющим, они просто прикреплялись к поверхности дна. Некоторые из них представляли собой настоящих великанов, раковины которых — миндалевидные, со складчатой структурой — от макушки до устья достигали 20 см. Впрочем, в отличие от современных двустворчатых моллюсков, стенки древних организмов этой группы по сравнению с их размерами были тонкими, как бумага. Их верхние створки иногда украшали устрицы, гребешки, мшанки, морские желуди-балянусы и трубчатые черви. Тем не менее обычно двустворчатые-иноцерамы обитали в местах, где было слишком мало кислорода для «нормальных» моллюсков и других беспозвоночных. Многие наши коллеги используют геохимические методы в исследованиях различий древних и современных двустворчатых. Странности сообществ двустворчатых моллюсков мезозойской эры блестяще показаны, например, в недавней совместной работе Нила Ландмана из Американского музея естественной истории и геохимика Кирка Кокрана. Один только размер иноцераров в сравнении с прочими двустворчатыми может говорить о том, насколько необычными были эти существа. Самые большие современные двустворчатые — тропические тридакны — могут достигать 15 см в длину, при этом вес их живой ткани составляет около 0,5–1 кг. Некоторые устрицы бывают примерно 30 см в длину, но никак не больше. Размеры иноцераров находятся где-то между гигантскими тридакнами и гуидаками. Разнообразные иноцерамы процветали в «парниковых» морях с пермского периода до окончания мела, периода их полного вымирания. Иноцерамы существовали в симбиозе с микроорганизмами, помогавшими им выживать за счет метана и других химических веществ, поступающих из органического материала со дна моря, — они не фильтровали воду ради пищи, как это делают современные двустворчатые.

Еще следует поговорить о средних слоях океанских вод парниковой эпохи, которые находились слишком далеко от солнечного света, но все же в десятках и даже сотнях метров от затхлого дна^[200]. Огромные пространства средних слоев морской воды сегодня являются самой большой средой обитания на планете, освоенной существами, которые, с одной стороны, никогда не поднимаются к поверхности, атмосфере и солнцу, а с другой — никогда не спускаются ко дну. В этой экосистеме жизнь приспособилась быть всегда «посерединке», и для подобных организмов как теплые мелководья, так и холодные глубины будут смертельны как по причине температурных и кислородных условий, так и в связи с наличием хищников. В такой экосистеме жизненно важным становится постоянное движение в толще воды. В наших морях наиболее показательным представителем этой экосистемы является кальмар — животное, которое в ходе эволюции приобрело плавательные щупальца, а также накопления внутри тела жира и других веществ, в том числе богатых аммиаком, что делает его тело легче морской воды.

Добычей кальмаров служат различные плавающие существа, небольшие по размеру, но зато многочисленные и разнообразные, проживающие в той области водных толщ, которая известна как глубоководный рассеивающий слой (ГРС), поэтому совокупность данных организмов также носит название ГРС. Кроме того, такое название связано с тем, что обнаружили их в 1940-х годах с помощью первых сонаров. ГРС состоит из бесчисленных мелких ракообразных и прочих членистоногих, например, бокоплавов и равноногих, а также других различных типов животных. В дневное время этот внушительный живой слой простирается примерно на 600 800 м в глубину и на сотни и тысячи километров во всех направлениях от берега. С наступлением темноты все сообщество начинает медленно подниматься к верхним водам, а когда становится совсем темно, тонны этой живой массы оказываются в верхних, более теплых, богатых пищей слоях. При дневном свете эти области моря оказались бы смертельными для крошечных мясистых членистоногих — основных представителей фауны ГРС, ведь тогда они хорошо заметны для хищников — рыб и кальмаров.

Сегодня мы располагаем убедительными доказательствами того, что эти обитатели морских толщ впервые появились в меловом периоде и являлись в те времена принципиально новым, до тех пор на планете не известным типом экосистемы. До мелового периода пищевых ресурсов в средних слоях океана не было, а потому не было и животных, которые бы развили у себя приспособления для пребывания в тех областях, причем не только для плавания как такового, но и для ежесуточной миграции на сотни метров вверх и обратно в глубину. Но с появлением этих членистоногих в средних слоях воды эволюция быстро породила и животных, способных питаться ими. У новых хищников появились новые приспособления для плавания в морских толщах, включая самое фундаментальное — способность быть легче воды.

Плотоядными животными, которые развили у себя такую способность, в основном были головоноги-аммониты, но формами они сильно отличались и от привычных для нас современных организмов, и от своих предков, которые обитали непосредственно у дна. У аммонитов, обитавших в средних слоях моря, имелись причудливые раковины, которые позволяли им держаться на плаву всю жизнь, однако эти раковины не позволяли развивать большую скорость. Но в областях, где водилось столько представителей ГРС, плотоядные аммониты могли просто оставаться на месте в толще воды, мигрируя вслед за перемещением пищевых ресурсов: пищи было много, а опасности от других хищников не наблюдалось. Так, не торопясь, они и проживали свой век. По существу, это были живые воздушные шары, у которых имелось приспособление для подъема и погружения, а снизу — корзина с «пассажиром».

В толще воды аммонитам необходимо было каким-либо образом контролировать свои подъемы и погружения^[201]. Мы знаем, что система камер в раковине современного наутилуса довольно примитивна и ею трудно управлять. Впрочем, возможно, древние головоногие намного ловчее управлялись со своими раковинами, у которых имелось больше камер и удобных перегородок, что позволяло эффективнее перекачивать воду и достигать довольно большой скорости. Головоногие позднего мела называются гетероморфными из-за неправильной структуры своих раковин — подобных им не было ни до, ни после. Они появились в девоне и вымерли в конце мелового периода, просуществовав, таким образом, почти 60 млн лет — до того самого дня, когда Чуксулубский астероид стер их с лица земли.

Раковины некоторых гетероморфных аммонитов напоминали раковины гигантских улиток, но состояли из камер, наполненных воздухом, кроме одной, нижней, в которой находилось мягкое тело моллюска вместе с его щупальцами и всем остальным. Другие

аммониты выглядели как громадные канцелярские скрепки, а иные — как крюки. Самыми распространенными тем не менее являлись конусовидные. Острый конец конуса был первой камерой, которая образовывалась у молодых аммонитов, но у взрослых аммонитов эти длинные и тонкие конусы могли достигать 2 м в длину. Они висели в толще воды в вертикальном положении, их головы со щупальцами находились прямо под конусом. Так выглядели головоногие рода *Baculites* — самые распространенные на планете плотоядные животные мелового периода.

Большие стада таких конусов наполняли просторы средних толщ океана^[202]. Их часто можно увидеть на картинах, изображающих моря мелового периода, и неизменно их рисуют неправильно — как длинных стреловидных созданий, расположенных в воде горизонтально, будто это рыбы или кальмары, что являлось совершенно невозможным. Головоногие рода *Baculites* располагались вертикально, острым концом вверх и тяжелой головой со щупальцами вниз. Они не могли передвигаться в стороны или даже дрейфовать в боковом направлении. Для них был возможен лишь один вектор — вверх-вниз. Вероятно, эти существа удивительно быстро перемещались вверх, используя реактивную силу, а затем медленно погружались на глубину. Скорее всего, акулы и другие хищные рыбы бывали сбиты с толку, пытаясь поймать таких головоногих, поскольку привыкли, что жертва удирает в сторону. Вместо этого хищники беспомощно проплывали в своих атаках вперед, глядя, как длинное, вертикально ориентированное в воде существо стремительно стартует вверх, вместо того чтобы также уплыть вперед — от хищника, как это сделала бы любая приличная жертва.

Мезозойская морская революция

Мезозойская эра стала, по выражению палеобиолога Гэри Вермейджа, временем морской революции^[203]. С точки зрения эволюции морские хищники той эпохи стали по-настоящему свирепыми.

Гэри Вермейдж, наш друг и коллега из Калифорнийского университета в Дэвисе, ослеп в раннем детстве, поэтому наблюдать за тем, как он «рассматривает» (так он это называет) причудливые раковины мезозойских моллюсков — все равно что смотреть на руки пианиста во время игры. Его движения быстры, прихотливы, пальцы будто лишены костей. Так Гэри «рассматривает» морфологические особенности раковин: от верхнего завитка до устья. Легкими прикосновениями он изучает известковую поверхность пупочной области раковины и зубцы на внешней губе устья. Мы водим его от одного музейного стенда к другому, а затем он «ведет» нас в сферы, «увиденные» им единственным доступным ему способом — через прикосновение.

Прикосновение запоминается, а также помогает визуализировать результат, и вот Вермейдж с помощью прикосновений объясняет нам, как новые хищники мезозойской эры были способны разламывать и разгрызать известковую броню травоядных беспозвоночных и хищников поменьше. В совокупности эти новые способности плотоядных животных мезозоя называются мезозойской морской революцией.

Сначала понятие «революция» относилось только к новой способности хищников разламывать раковины, что произошло после пермского массового вымирания. Это был новый способ извлекать плоть из брони, которая до того казалась непробиваемой, — из панцирей морских ежей, двустворчатых моллюсков, улиток и плеченогих. Но вскоре границы расширились.

Адаптация жертв также оказалась весьма впечатляющей. Двустворчатые, которые раньше обитали только на морском дне, приобрели способность глубоко зарываться в грунт. Эту новую группу двустворчатых из-за наличия «зубов» у замкового края раковины назвали гетеродонтным типом. Они подверглись большому анатомическим изменениям: часть их мантии преобразовалась в пару сифонов. Такие роющие двустворчатые сегодня остаются самой разнообразной группой своего класса, демонстрируя широкий спектр видов, которые могут быстро зарыться в песок, грязь или ил. Единственная цель подобного поведения — спрятаться от хищников. Если сидеть в грунте, это не улучшит возможности пропитания, однако значительно повысит выживаемость. Среди прочих животных, которые избрали самозакапывание как способ уйти от преследования хищников, — улитки, новые группы полихетовых червей, некоторые рыбы и морские ежи совершенно нового типа^[204].

Другой группой беспозвоночных, которые подверглись радикальному эволюционному обновлению в тот период, являлся класс иглокожих под названием «криноидеи»^[205]. Эти большие беспозвоночные, похожие на цветы (поэтому их еще называют морскими лилиями), были широко распространены еще в палеозое. Для них характерен сидячий образ жизни: как только личинка покидает планктонное сообщество и прикрепляется к какой-нибудь поверхности, она уже никогда не покидает избранного места. Когда проезжаешь по дорогам Среднего Запада США, то хорошо видны следы былого процветания криноидей: отвалы грунта у каждой дороги испещрены маленькими круглыми «косточками» — поперечными срезами длинных стеблей морских лилий. Чтобы образовалось такое большое количество этих организмов, нужно широкое, неглубокое, совершенно прозрачное и теплое море, и тогда его дно будет полностью затенено целыми лесами морских лилий — сомнительно, чтобы

сквозь них ко дну проникало солнце. Пищей им служит планктон, и живут они на «тихой улице», по крайней мере, с позиций обмена веществ. Если хищник или шторм сорвет морскую лилию с ее места, то она вскоре погибнет.

Ничто так не стимулирует эволюционные процессы, как массовая гибель видов. Пермское вымирание почти полностью уничтожило всех морских лилий на планете, а в новой эре — мезозое — они стали легкой добычей многочисленных хищников, которые уже были способны поедать морских лилий. Честно говоря, питаться морскими лилиями нелегко, ибо мало найдется в природе организмов, у которых столь малое количество плоти было бы прикрыто таким большим количеством карбоната кальция. Однако криноидеи эволюционировали, новые их формы часто бывают бесстебельчатыми и далеко не всегда нуждаются в пожизненном прикреплении к грунту. Такими мы знаем их сегодня — это одни из самых красивых обитателей современных коралловых рифов. Они даже могут плавать, хотя медленно и неуклюже, используя руки-щупальца для свободных «перелетов» в воде.

Мезозойская морская революция затронула не только отношения «охотник — жертва», но и сферу использования животными новых сред обитания^[206]. В связи с этим следует упомянуть развитие у двустворчатых моллюсков способности глубже зарываться в грунт для защиты от хищников, а также увеличение числа беспозвоночных, питающихся органическими осадками. Эти перемены в анатомии и образе жизни подтверждаются увеличением разнообразия и числа ископаемых останков в соответствующих отложениях. Примечательно, что данная ситуация схожа с той, которую можно наблюдать в отношении кембрийского взрыва. Результат мезозойских изменений — полная биотурбация (биологическое преобразование) осадочных пород данной эры.

Значительные изменения в мезозойском океане затронули не только поверхность грунта и то, что происходило под поверхностью. Впервые со времени появления животных стала обитаемой вся толща воды. Многие новые формы вообще не являлись животными, а относились к простейшим или даже к одноклеточным планктонным растениям. В отложениях мезозоя найдены микроостанки новых групп организмов, включая разнообразных фораминифер, подобных амебам, но имеющих скелет. Последние жили и на дне, и плавали в толще воды над ним. В состав планктона также входили радиолярии, или лучевики. Однако самым кардинальным новшеством в планктоне мезозойской эры, вероятно, следует признать группу водорослей, называемых кокколитофоридами, чьи крошечные скелеты, скопившиеся на морском дне и отвердевшие, являются хорошо известным веществом — мелом.

На поверхности кокколитофорид образовывались ажурные известковые пластинки — кокколиты, которые после гибели водорослей опадали на дно и накапливались в таких невообразимых количествах, что в конце концов образовывали колоссальные осадочные формации, как, например, знаменитые Меловые скалы в Дувре. В Северной Европе находится множество таких скал — в Британии, Франции, Польше, Бельгии, Голландии, по всей Скандинавии, а также во многих местах бывшего Советского Союза до самого Черного моря. Кокколиты повлияли на состояние мировых температур. Они белые, и эта белизна способствует отражению солнечных лучей обратно в космос, в результате чего планета охлаждается.

Как и во время кембрийского взрыва, когда у животных за короткий геологический интервал времени развивались новые морфологические типы на основе модификаций дыхательных систем, так и в триасовых морях животные обрели большой спектр новых адаптивных свойств. На суше, как мы уже видели, животные экспериментировали в основном с типами легких. В океане организмы также осваивали новые способы дыхания. Двустворчатые моллюски, например, были группой, у которой развился новый

морфологический тип и даже новая физиология в ответ на появление почти безграничных пространств, богатых пищей, но бедных кислородом.

Недостаток кислорода сделал дно моря в некотором отношении прекрасным местом обитания. На дне скапливалось большое количество восстановленного углерода в форме мертвого планктона и других погибших организмов. Если бы у дна было много кислорода, весь этот органический материал вскоре был бы употреблен в пищу организмами, которые фильтруют воду или питаются останками со дна. Однако дефицит кислорода удерживает таких животных подальше от подобных мест, даже бактерии, которые способствуют разложению органических останков, здесь не встречаются. Впрочем, хотя уровень кислорода в триасовый период сильно упал, двустворчатые моллюски нашли выход из положения. Некоторые, например, иноцерамы, обитавшие в областях, где было хоть немного кислорода, питались не органическими останками, упавшими на дно, но метаном, поступавшим из органических отложений. Свободно себя чувствуют в бескислородных условиях или в местах с очень незначительным содержанием кислорода метаногены — метанобразующие бактерии. Даже там, где у дна есть немного кислорода, в органических отложениях на глубине всего в несколько сантиметров кислорода уже нет, и это создает идеальные условия для жизни метаногенов. Продуктом их метаболизма является метан. На жабрах двустворчатых могли обитать и другие метанобразующие бактерии, а также те, которые разлагают органику. В конце концов, моллюски могли питаться и самими бактериями. Похожие механизмы пищевого поведения сегодня можно обнаружить у глубоководной фауны — гигантских трубчатых червей или двустворчатых, которые для питания используют неорганические вещества. Впрочем, существуют и отличия: области обитания современной глубоководной фауны относительно насыщены кислородом, представителям таких экосистем даже жабры не нужны, так что мезозойским двустворчатым повезло меньше.

Другим путем адаптации в ответ на недостаток кислорода в океане последовали ракообразные — крабы и омары. В палеозойских породах можно видеть останки ракообразных, строение тел которых во многом совпадает с креветкой, но крабы — более позднее эволюционное новшество. Краб — это креветка, у которой брюшко подвернуто под туловище. Слияние головы и грудного отдела превратило краба в бронированный орешек, который не так-то просто разгрызть какому-нибудь хищнику. Размещение брюшка внутри брони — гениальное изобретение. Как правило, именно брюшко является наиболее уязвимой частью при нападении хищника, а защитив этот участок тела, краб стал быстро распространяться по морским просторам. Большие клешни краба позволяют ему легко раскалывать раковины моллюсков и других жертв с твердой защитой — крабы известны как дуорофаги, то есть хищники, питающиеся организмами, у которых есть панцирь.

Таким образом, стимулом для эволюционных изменений в строении тела краба послужило стремление как к защите (укрепленный панцирь, слияние головы и груди, подвернутое брюшко), так и к нападению (пара мощных клешней). Но была у краба и другая причина перестройки тела, связанная с особенностями дыхания: его жабры теперь надежно спрятаны под твердым защитным панцирем, а вода к жабрам поступает благодаря системе перегона воды внутрь панциря и наружу, действующей как насос. Система дыхания краба — замечательный способ усилить ток воды, поступающий к жабрам.

Крабы эволюционировали из существ, похожих на креветок, и мы можем проследить этапы эволюции дыхательной системы по останкам предков краба: у креветки жабры частично укрыты под телом животного, при этом они прикреплены к сегментам тела и открыты снизу для доступа воды.

Мезозойские «парниковые» океаны со временем изменились. Две группы самых

характерных морских обитателей тех времен — аммониты и двустворчатые-иноцерамы — могли бы существовать и сегодня, но 65 млн лет назад на Землю обрушился Чуксулубский астероид, который навсегда изменил вид земной биосферы.

Глава 16

Гибель динозавров:

65 миллионов лет назад

Картины событий прошлого планеты иногда самым удачным образом отражены, как ни странно, в научной фантастике. Ниже приводится лучшее, на наш взгляд, описание самого знаменитого массового вымирания — мел-палеогенового. Нам очень нравится этот замечательный отрывок из книги Уильяма Гибсона и Брюса Стерлинга «Машина различий»:

Полыхали пожары, мезозойскую Землю хлестали ураганы, бушующая атмосфера насытилась кометной пылью и дымом, планету окутал мрак. Гибли лишённые солнечного света растения, а вслед за ними и могучие динозавры, жестко адаптированные к рухнувшему, безвозвратно ушедшему в прошлое миру. Но в наступившем хаосе еще активнее заработали механизмы эволюции, прошло какое-то время, и опустошенную Землю заселили новые, странные и неожиданные существа^[207].

Всем известно, что те «новые, странные и неожиданные существа» были новыми группами млекопитающих, населяющих Землю и по сей день. Почему существует такая глубокая уверенность в том, что именно астероид стал причиной мел-палеогенового массового вымирания? Это *факт* обсуждается приблизительно с 1990 года, через 10 лет после того, как исследовательская группа Альвареса из Беркли опубликовала свой сенсационный материал, совершенно изменивший не только наше понимание сути массовых вымираний, но и вообще представления о геологических процессах в целом.

Изучение массовых вымираний тесно переплетается с идеями, лежавшими в основе геологии в момент ее зарождения как современного научного направления, то есть в первые 60 лет XIX века. Десятилетиями ученые обсуждали базовые принципы, которые позволили бы объяснить, каким образом возникли все эти геологические формации, породы и отложения, а также растения и животные Земли. Основная борьба развернулась между представителями униформизма, повторявшими как мантру утверждение, что настоящее есть ключ к тайнам прошлого, и группой ученых, продвигавших принцип катастрофизма. Идеологом катастрофизма можно считать Жоржа Кювье, который первым осознал реальность вымираний как таковых. Позднее катастрофизм поддержали и другие исследователи, в том числе широко известный Альсид д'Орбиньи, чьей заслугой является разработка и модернизация геологической хронологии. Однако, несмотря на их исключительный вклад в науку, и Кювье, и д'Орбиньи пытались объяснить очевидные факты массовых вымираний сверхъестественными причинами. Оба верили, что некая высшая сила посылает на планету потопа, стирает с лица земли большую часть живых организмов, а затем вновь населяет сушу и океан новыми существами.

Новые поколения геологов то возвращались к идеям униформизма и катастрофизма, то вновь отвергали их. Униформизм в какой-то момент победил, поскольку в описываемых образцах пород, количество которых постоянно увеличивалось, никто не находил подтверждения ни одному событию мирового потопа, не говоря уж о целой серии последовательных потоков, которые могли бы стать причиной массовых вымираний. Самые крупные из них, известные как «Большая пятерка», это ордовикское, девонское, пермское,

триасовое и мел-палеогеновое вымирания. К XX веку катастрофизм больше не находил поддержки среди ученых, за исключением тех, кто писал книги, тешащие представления человечества о прошлом, как о временах куда более захватывающих, чем постепенное скучное послойное накопление геологических летописей. Впрочем, и последователи униформизма (в том числе Дарвин) кое в чем чувствовали себя не очень уверенно — в объяснениях массовых вымираний.

Геологическая наука пришла к заключению, что массовые вымирания проходили очень медленно, а с учетом длительности протекания этих событий даже наблюдаемые изменения климата и колебания уровня Мирового океана могут стать объяснением причин вымираний. Таких мыслей придерживались все геологи во второй половине XX века.

Впрочем, раздавались и голоса протеста, хотя и совсем немного. Одним из самых заметных был голос Отто Шиндевольфа, профессора палеонтологии из Тюбингенского университета на юге Германии. Шиндевольф возражал против теории медленного и последовательного протекания массовых вымираний. Напротив, после кропотливой исследовательской работы с образцами пород и наблюдений за изменениями в них Шиндевольф пришел к выводу, что, возможно, причинами вымираний являлись намного более быстрые и катастрофичные события. Он предположил, что известные массовые вымирания могли быть вызваны, в том числе, воздействием космических лучей. От него же пошло название нового направления исследований — неокатастрофизм, под которым Шиндевольф подразумевал диаметрально противоположные униформизму научные подходы изучения прошлого.

Коллеги Шиндевольфа остались глухи к его голосу. Медленное изменение климата и медленные колебания уровней океана были «фактами» и предполагаемыми причинами пяти «великих массовых вымираний». Начиная с 1950-х годов, в течение 30 лет, геология бездействовала, пребывая в удобной для себя уверенности, что все можно объяснить земными (то есть медленными) причинами. Таково было положение вещей в геологической науке со времен работ Шиндевольфа (1950-е годы) и до 1980-х годов. Но внезапно все изменилось. Шестого июня 1980 года, в день 36-летия высадки союзников в Нормандии, работа Альвареса, посвященная падению астероида как причине мел-палеогенового вымирания, стала настоящим вторжением на территорию закостенелого униформизма и, в частности, на позиции общепринятых тогда точек зрения на причины массовых вымираний^[208]. Это был удар, развязавший научную войну, которая так или иначе продолжается по сей день.

Космическое воздействие и массовые вымирания

Наличие на каждой планете и спутнике с твердой поверхностью многочисленных кратеров, оставленных падением небесных тел, дает убедительное представление о важности и частотности таких происшествий, по крайней мере, на ранних этапах существования Солнечной системы. Вероятно, столкновение с космическими объектами является проблемой любой планетарной системы, по-видимому, такие события — самые частые из всех планетарных катастроф. Они могут полностью изменить биологическую историю любой планеты, уничтожив господствующие группы организмов и таким образом освободив путь либо для совершенно новых форм, либо для тех, которые до катастрофы играли незначительную роль в экосистемах. Поэтому работа Альвареса 1980 года привела к пересмотру сразу многих научных положений.

Существуют две основные линии доказательств того, что мел-палеогеновое вымирание стало результатом столкновения Земли с большим небесным объектом: обнаружение в пограничных слоях соответствующих периодов, во-первых, повышенного содержания иридия и, во-вторых, большого количества «ударного кварца». К 1997 году высокие концентрации иридия были зафиксированы по всему миру более чем в 50 местах, где исследовались границы между меловым и палеогеновым периодами. Иридий рассматривается как индикатор столкновений Земли с космическими телами, поскольку этот элемент крайне редко встречается на поверхности нашей планеты, но при этом в значительных объемах содержится в большинстве астероидов и комет. В свою очередь, частицы ударного кварца считаются индикаторами космических столкновений, потому что многочисленные тонкие пластины-ламели, обнаруженные в кварце на мел-палеогеновых границах, могут быть образованы только при очень большом давлении, например, таком, которое возникает, если большой астероид на огромной скорости сталкивается с кварцсодержащими породами. Никакие «домашние» земные явления не способны сформировать подобные преобразования кварца.

Помимо свидетельств, связанных с иридием и ударным кварцем, в границах мела и палеогена также имеются следы крупных пожаров, которые могли возникнуть сразу после падения астероида^[209]. По всему миру в глинах мел-палеогена обнаружены мельчайшие частицы того типа сажи, который образуется при сгорании растительности, а количество этих остатков сажи говорит о глобальных масштабах лесных пожаров и горения травы.

Первоначально данные были противоречивы, однако минералогические, химические и палеонтологические исследования, проведенные в 1980-х годах, убедили большинство специалистов в том, что 65 млн лет назад на Землю упал большой (диаметром примерно 10–15 км) астероид (или комета). В тот же период более половины всех земных видов, обитавших на планете, внезапно вымерло, и это последнее явление обозначается как граница между меловым и палеогеновым периодами. Открытие большого ударного кратера, возраст которого соответствует времени предполагаемого падения (кратер Чуксулуб на полуострове Юкатан в Мексике) устранило почти все сомнения, которые еще оставались относительно теории столкновения.

Технически причиной вымирания, по мнению Альвареса и его коллег, стало затемнение, которое длилось много месяцев после падения астероида. Затемнение возникло из-за того, что при ударе в атмосферу поднялось множество частиц метеоритных и земных пород, и продолжалось это явление довольно долго, что привело к гибели большей части растительной жизни на планете, включая планктон. Исчезновение растений повлекло гибель

прочих групп организмов в пищевой цепи.

Несколькими научными группами были построены модели, позволяющие оценить масштабы биологической катастрофы, вызванной резким изменением состояния атмосферы. Очевидно, что произошел также мощный выброс серы в воздух. Небольшое количество серы участвовало при этом в образовании серной кислоты, которая обрушилась на Землю кислотным дождем, что также могло стать непосредственной причиной гибели флоры и фауны, но более вероятным фактором представляется связанное с этим похолодание. Однако более опасным для биосферы могло стать сокращение уровня солнечной энергии (до 20 %), вызванное поглощением лучей атмосферной пылью. Такого затемнения вполне хватило, чтобы на десятилетие установились морозные или близкие к ним температуры, и это в мире, который непосредственно перед столкновением был в основном тропическим. Совершенно внезапно на Землю пришла очень долгая зима. Все это подтверждает первоначальную гипотезу Альвареса о том, что главной причиной вымирания послужило именно затемнение.

Итак, после столкновения с астероидом (около 10 км в диаметре) в атмосферу Земли поднялась пыль — много пыли^[210], что привело к долговременному глобальному затемнению, а следствием этого стало изменение мирового климата. Понятно, что затемнение блокировало фотосинтез, к тому же сильно похолодало. Но существовал еще один угрожающий фактор, на который сначала не обратили внимания: огромные концентрации пыли в атмосфере сильнейшим образом повлияли на круговорот воды. Уровень мировых осадков снизился на 90 %, и такое положение дел сохранялось несколько месяцев, а еще полгода после этого уровень осадков составлял всего 50 % от нормы. Иными словами, на планете было темно, холодно и сухо — идеальные условия для массового вымирания, особенно для растений и животных, которые питаются растениями.

Наконец, помимо прочего, было учтено, что через несколько часов после столкновения на поверхность планеты с большой скоростью начали падать куски породы, которые побывали в ближайшем космосе, куда их забросило ударной волной, вернулись на Землю очень горячими и подожгли растительность. Последовал самый страшный за всю историю планеты глобальный пожар, который даже один, без других разрушительных явлений, мог уничтожить всех сухопутных динозавров.

Летопись мел-палеогенового вымирания

Известно, что во время мел-палеогенового вымирания погибло около 75 % всех видов. На суше исчезли динозавры и распространились млекопитающие. В морях, если рассматривать потери мелового периода, исчезли аммониты, а в палеогене господствующее положение заняли улитки и двустворчатые. Впрочем, с развитием технологий и методов датировки становится все очевиднее, что мел-палеогеновая граница намного сложнее, чем предполагалось первоначально. Сейчас мы знаем, что было как минимум две волны вымирания меньших масштабов, которые предшествовали собственно великому мел-палеогеновому массовому вымиранию. Исследования нескольких последних лет продемонстрировали, что свою — всегда заметную — роль в вымираниях и на этот раз сыграли излияния базальта.

Окаменелостей динозавров не так уж и много на самом деле. Поэтому так сложно представить себе по-настоящему реальную картину их вымирания. Палеонтологическая летопись полна микроскопическими окаменелостями, их изучение внесло неоценимый вклад в доказательство теории столкновения Земли с астероидом (или кометой) как причины внезапного вымирания. Однако хотелось бы знать и о судьбе более крупных окаменелостей сухопутных и морских обитателей, а большинство изученных относятся к головоногим аммонитам, описанным в предыдущей главе.

Местом, где удобнее всего исследовать последних аммонитов, обитавших у экватора в позднем меловом периоде, является толстый слой соответствующих пород в Бискайском заливе — большая область отложений, протянувшаяся с юго-запада Франции к северо-востоку Испании. А лучше всего в этом регионе изучать скалистый берег возле старой баскской деревушки Сумая^[211]. Там, подобно книжным страницам, открываются сотни метров породы возрастом от 72 до 50 млн лет. Границы периодов, отражающие массовое вымирание, открыты взору и очевидны, в том числе благодаря изменениям в литологии и цвете пород.

Возраст старейших отложений вдоль побережья, где находится Сумая, — около 71 млн лет. Породы состоят из отдельных слоев, от 15 до 30 см, каждый слой — парный, представляет собой сочетание более толстой известняковой части и тонкой глинистой прослойки с незначительным содержанием известняка. Тысячи и тысячи таких парных слоев когда-то отвердели и создали береговую линию. По типам породы и по ископаемым мы можем определить, что эти слои сформировались на относительно большой глубине моря, вероятно, в самом глубоком месте континентального шельфа, а может, даже на самом его краю, где-то между 200 и 400 м под водой.

Слои располагаются перпендикулярно основной линии берега и имеют сильный уклон к северу. С юга на север породы «молодеют». Очень крутой уклон пород и высокий прилив делают визиты к большей части данных отложений весьма затруднительными.

В начале пути по этой местности, непосредственно на пляже (и в самом начале истории этих пород), откуда начинается крутой — и единственный — подъем на скалы, окаменелости можно увидеть повсюду. Большинство из них — большие двустворчатые-иноцерамы, о которых мы писали в предыдущей главе, но также много аммонитов, морских ежей, имеющих форму сердца. Костей позвоночных не видно, нет и зубов акул, и, конечно, никаких динозавров, а ведь возраст этих морских отложений совпадает с возрастом тех образованных на суше пород, в которых окаменелости динозавров встречаются во множестве.

Больше всего вызывают удивление иноцерамы. Они достигают 60 см в диаметре и

выглядят как плоские гигантские тарелки, располагаются рядом со своими более мелкими сородичами других видов. На сотни метров местных слоев их останки являются самыми многочисленными. Окаменелости легко можно найти в верхних и нижних границах слоев, особенно в верхних. Возле Сумаи есть где поохотиться за окаменелостями, они в огромных количествах находятся в слоях разных возрастов. Неожиданно исчезают большие двустворчатые — примерно в сотне метров ниже того уровня породы, где хорошо заметно вымирание аммонитов. Сами аммониты и морские ежи продолжают попадаться в изобилии дальше в верхних слоях, а затем совершенно внезапно тоже исчезают.

Работа на побережье Бискайского залива, поддерживаемая исследованиями других отложений мелового периода, позволяет установить, что двустворчатые-иноцерамиды вымирали постепенно в течение приблизительно 2 млн лет перед внезапным исчезновением аммонитов. Статистические методы, разработанные Чарльзом Маршаллом из Калифорнийского университета в Беркли, помогли самому Маршаллу и Питеру Уорду, одному из авторов этих строк, выяснить, что, по крайней мере, в данном регионе непосредственно перед падением астероида обитали 22 вида аммонитов, что подтверждается составом пород: иридий, ударный кварц, тектиты (маленькие стеклянные шарики метеоритного происхождения).

Любопытным фактом в истории вымирания иноцерамов является не то, что они погибли до аммонитов, а то, что их вымирание произошло в другое время и в другом месте. Например, последние иноцерамы в породах мелового периода в Антарктике не моложе 72 млн лет, то есть там они вымерли на 7 млн лет раньше аммонитов. Теперь мы знаем, что среди этих двустворчатых, обитавших когда-то по всему миру, вымирание видов происходило волнообразно, начиная с регионов Антарктиды и постепенно распространяясь к Северному полушарию. Такое вымирание было похоже на болезнь, медленно продвигавшуюся к северу и убивающую виды двустворчатых один за другим. Но это была не болезнь, это были холод и кислород.

В конце мелового периода в верхних южных широтах стала проявляться термохалинная циркуляция кислородного типа, и за 2 млн лет холодная, насыщенная кислородом вода со дна океана распространилась по всем морям, в направлении с юга на север. Это явление явилось фатальным для иноцерамов, и их исчезновение стало историческим событием, поскольку они процветали в течение 160 млн лет, но были приспособлены к обитанию совсем в других океанах — с низким содержанием кислорода и теплым морским дном. Холод и кислород их убили.

Просто столкновение?

Давайте подведем небольшой итог того, что нам известно о причинах мел-палеогенового массового вымирания. Произошло столкновение Земли с космическим объектом, это было одиночное событие, случилось вскоре (через 1–3 млн лет) после двух быстрых изменений уровня Мирового океана, в период между которыми значительно изменился и химический состав океана^[212]. В результате столкновения на полуострове Юкатан возник большой (около 300 км в диаметре) кратер, названный Чуксулуб. Хотя все еще нет единого мнения относительно реального первоначального размера кратера, никто не сомневается, что это именно кратер. Геологические и географические особенности территории в месте столкновения могли усилить губительные последствия, возникшие от удара. Это тем более вероятно, потому что серные испарения в том регионе и сера, содержащаяся в самом космическом теле, могли увеличить масштаб катастрофы. По-видимому, падение астероида в неглубокое море, располагавшееся на экваториальных широтах, имело невероятно разрушительные последствия: изменения состава атмосферы на всей планете, падение температуры, кислотные дожди и пожары по всему миру. Многие (но не все) ученые также согласны с тем, что большие, грубые по фактуре отложения, состоящие из обломков пород, расположенные во многих местах вдоль восточного побережья Мексики, были сформированы ударными волнами от столкновения. Долгая зима, последовавшая за столкновением и вызванная затемнением в результате стремительного наполнения атмосферы пылью, послужила основным фактором гибели живых организмов.

Модель атмосферных изменений, последовавших за падением астероида, также учитывает, что пыль, в больших концентрациях поднимавшаяся в атмосферу, вызвала затемнение, а это привело к тому, что уровень света резко снизился, поэтому ослабился или вовсе прекратился процесс фотосинтеза. Большая концентрация пыли в атмосфере также повлияла на круговорот воды на Земле. Согласно климатологическим исследованиям, после столкновений планеты с большими небесными объектами средний общемировой показатель осадков снижается более чем на 90 % и на несколько месяцев остается в таком состоянии, а потом в течение полугода не превышает 50 % от нормы. Последствия всех этих явления для биосферы хорошо известны^[213].

А что же базальт?

Выше мел-палеогеновое вымирание представлено как комплекс последствий одного события. На Землю что-то упало, и это падение привело к изменениям в окружающей среде, достаточным, чтобы уничтожить более половины всех видов. Все просто, но есть один момент, который не дает покоя. Земля столкнулась с астероидом в период своей невиданной вулканической активности, сопровождавшейся излиянием базальта. Это событие произошло в области, которая теперь называется «Деканские траппы». Из недр Земли на поверхность вышли многочисленные тонны базальта. Примерно 84 млн лет назад массы расплавленной породы отделились от мантии и стали подниматься сквозь земную кору, этот процесс занял около 20 млн лет. Это движение внутри планеты попутно вызвало ряд истинных перемещений полюсов (реакция вращающейся планеты на смещение веса в областях, близких к ее поверхности). Быстрые перемещения в масштабе планеты могли привести к нарушению баланса в некоторых экосистемах. Например, большая часть западной Канады и Аляска, по-видимому, до периода 84 млн лет назад находились на тех же широтах, что и Мексика, но в конце мезозоя оказались довольно далеко оттуда.

Самым важным последствием излияний базальта, как уже было несколько раз показано нами в данной книге, являлось насыщение атмосферы углекислым и другими парниковыми газами. Земля быстро потеплела на полюсах, в высоких широтах и, хотя и не так быстро, — на экваторе. Эти условия послужили причиной так называемого парникового вымирания: большое излияние базальта вызывает сильное потепление в высоких широтах, что приводит к значительному уменьшению концентрации кислорода в океане, к поверхности океана начинают подниматься насыщенные сероводородом и потому токсичные глубинные воды — живые организмы погибают, что и произошло в девоне, перми и позднем триасе. Маленький гнусный секрет геологов заключается в том, что мы очень долго не хотели раскрывать истинных причин тех массовых вымираний. Кому охота признавать, что биологическая катастрофа произошла из-за вонючего сероводорода, тогда как есть красивый кратер от упавшего астероида?

Наука тем не менее все расставляет по своим местам, если предмет изучения достаточно интересный. Поэтому стоит вспомнить еще несколько интересных вопросов относительно того, почему динозавры (да и не только они) вымерли 65 млн лет назад. Например, почему воздействие Деканских траппов [\[214\]](#) на биосферу тех времен не так очевидно, как в случаях с другими излияниями базальта, принесшими столько разрушений и погубившими столько видов?

На самом деле Деканские траппы произвели огромные разрушения. Возможно, самым ярким доказательством этому является, простите за нескромность, результат нашей работы в Антарктике. В 2012 году один из наших студентов, Том Тобин, показал, что действительно имело место потепление океана приблизительно за сотню тысяч лет до столкновения с астероидом, и вымирание видов вследствие этого действительно произошло. Глобальное потепление как один из конечных результатов излияния базальта заметнее проявляется в высоких широтах планеты. Тропики уже достаточно жаркие, какими им и полагается быть. В нашем современном мире мы наблюдаем как раз такую картину — Арктика и Антарктика подвергаются потеплению в большей степени, а вместе с тем и более заметному разрушению экосистем.

Все верно, в нас врезался большой астероид, и это привело к мел-палеогеновому вымиранию. Однако до этого события в течение сотен тысяч лет мир становился теплее из-за

излияния базальта. Мы можем закончить эту главу избитой «боксерской» метафорой: нокаут по определению — это один мощный удар, но очень редко один первый удар, не важно, насколько он силен, приводит к нокауту, сначала может состояться несколько раундов, с выпадами и ударами по корпусу. Деканские траппы «измотали» биосферу, астероид нанес решающий удар.

Глава 17

Третья эра млекопитающих: 65–50 миллионов лет назад

Самыми первыми из известных в истории млекопитающих были существа размером не больше крота, которых назвали морганукодонами, они обитали около 210 млн лет назад в позднем триасе. Хотя эти животные находились на периферии экосистем и опасались рыскающих повсюду хищных динозавров, но, в отличие от последних, каким-то образом выжили во время мел-палеогенового массового вымирания. Через некоторое время к морганукодонам присоединились и другие примитивные, но тем не менее «настоящие» млекопитающие. Все современные млекопитающие, включая человека, являются потомками одной группы, пережившей мел-палеогеновую биологическую катастрофу. Когда рухнул мир динозавров, планета подверглась нашествию крыс. По крайней мере, это были существа, по размеру и форме похожие на крыс^[215].

Палеонтологи долгое время полагали, что предки всех современных млекопитающих произошли из одной области северных материков, а когда в мезозое Пангея медленно начала распадаться, те первые млекопитающие мигрировали к югу, к Антарктике и Австралии, по сухопутным перемычкам между континентами. Представьте себе потеки краски, стекающей по земному шару с севера на юг — так раньше представляли себе распространение млекопитающих по миру. Однако от этой теории пришлось отказаться, как и от многих других, по мере накопления исследовательского материала, собранного благодаря ископаемым находкам и данным генетики. Теперь все выглядит наоборот: млекопитающие мигрировали с юга на север, постепенно «модернизируясь». Совершенно новые образцы ископаемых подтверждают, что на юге более развитые млекопитающие появились раньше, чем в северных областях.

Генетические исследования показывают, что XXI век — век научных сюрпризов^[216]. Вот три главных. Во-первых, крупнейшие «группы» млекопитающих — 18 существующих сегодня отрядов, а также некоторые из подотрядов и даже семейств на самом деле появились задолго до исчезновения динозавров, а это опровергает давно утвердившийся взгляд, что время развития данных групп — не ранее конца мел-палеогенового вымирания. Образцы окаменелостей демонстрируют, что большинство современных групп появились около 60 млн лет назад, после гибели динозавров, но, по данным молекулярных исследований, получается, что развитие разнообразия видов млекопитающих началось около 100 млн лет назад^[217].

Во-вторых, важнейшие эволюционные изменения и появление разнообразных таксономических групп произошли на южных континентах, а не на северных.

В-третьих, многие группы казались очень и очень дальними родственниками, а на деле вышло, что они чрезвычайно близки. Например, палеонтологи всегда считали, что летучие мыши входят в тот же подотряд, что и тупайи, шерстокрылы и приматы. Генетические данные тем не менее сближают летучих мышей с коровами, свиньями, кошками, лошадьми и китами. Киты, в свою очередь, сегодня известны тем, что происходят от животных, близких свиньям, а не тем существам, от которых произошли тюлени.

Своим эволюционным успехом млекопитающие обязаны особым изменениям в анатомии, в том числе отделению челюсти от ушных костей, что позволило черепу более

поздних млекопитающих раздвинуться в стороны и назад, то есть обеспечить место для более крупного мозга. Впрочем, самое важное новшество — эволюция зубов: верхние и нижние коренные зубы морганукодонов сцеплялись таким образом, что эти животные могли расчленять пищу на более мелкие части.

Современные млекопитающие делятся на две основные группы: более древние сумчатые, у которых детеныши рождаются совсем крошечными и затем донашиваются в особой сумке, и более поздние потомки древних предков — плацентарные млекопитающие. Новые исследования ДНК позволяют определить, что плацентарные возникли от сумчатых не позднее 175 млн лет назад^[218]. Это же подтверждают и ископаемые, особенно находки из Китая^[219] — там обнаружены совершенно неизвестные до недавнего времени ископаемые останки первых плацентарных, которые подтверждают сведения генетических исследований. Этому ископаемому существу, названному «эомайя», 125 млн лет, а это значит, что первые плацентарные начали появляться еще в юрском периоде^[220].

Самая древняя группа существующих сегодня плацентарных животных включает слонов, трубкозубов, ламантинов и даманов^[221]. Когда Африка отделилась от Пангеи, с ней вместе откололись и эти животные и развивались своим путем десятки миллионов лет. Также от Евразии и Северной Америки отделилась Южная Америка и стала родиной ленивцев, броненосцев и муравьедов. На северных континентах появились самые молодые плацентарные из всех, в том числе тюлени, коровы, лошади, киты, ежи, грызуны, обезьяны и... люди.

Если основное разнообразие млекопитающих возникло до мел-палеогенового вымирания, то самое заметное преобразование — увеличение размеров — произошло уже после этого события. В течение 270 тысяч лет млекопитающие становились все крупнее и многообразнее, хотя по-настоящему крупные животные среди них появились только 55 млн лет назад. Затем одновременно произошли два события: постепенное повышение среднемировой температуры и широкое распространение лесов по всей планете, даже у полюсов. Этот скачок в развитии растений, возможно, стал дополнительным толчком к распространению разнообразных видов млекопитающих.

Жизнь на суше в палеоцене

Палеоцен — особая эпоха палеогена — существовал только благодаря мел-палеогеновому вымиранию. Причина и следствие того массового вымирания были абсолютно неравноценными, а мир после него стал совсем-совсем другим, и причем на многих уровнях.

После исчезновения динозавров, которые властвовали над миром живой природы очень долгое время, безусловно, должен был возникнуть целый спектр новых экологических отношений. Исчезновение множества сухопутных животных произошло очень быстро, и поэтому появление новых форм напоминало весенний поток — так много новых видов возникло за короткий период времени. Очевидно, что млекопитающие стали самыми удачливыми организмами в игре на выживание на суше. Впрочем, вернулись и птицы и какое-то время соперничали с млекопитающими за наземные ресурсы.

Падение астероида серьезно повлияло на воздействие океана на сухопутные среды обитания. В течение тысяч лет экосистемы испытывали последствия того события, климат был нестабилен, а к этому добавлялось небольшое общее похолодание как на суше, так и в океане. Биосфера, разумеется, также подвергалась значительным изменениям. Например, гибель динозавров привела к тому, что лесов стало больше, и они стали гуще. Современные слоны, в силу своих пищевых привычек, заметно прореживают леса в местах своего обитания, и динозавры, скорее всего, делали то же самое. Но когда динозавров не стало, леса уплотнились и разрослись.

К концу палеоцена, более чем через 7 млн лет после катастрофы и мел-палеогенового вымирания, стабилизировался мировой климат. Планета медленно потеплела. По состоянию изотопов кислорода мы можем заключить, что температура экваториальных вод в верхних слоях достигала 20 °С, а в некоторых местах — и 26 °С, то есть ситуация было очень схожа с современным температурным режимом морей на тех же широтах. Однако в более высоких широтах мир того периода сильно отличался от современного. В Арктике и Антарктике температура верхних слоев океана достигала 10–12 °С, в то время как сегодня она близка к показателю замерзания воды. Таким образом, разница между температурами от экватора к полюсу составляла 10–15 °С, что в два раза меньше современного состояния. Тем не менее, несмотря на разницу температурных режимов, циркуляция воды в океане в то древнее время во многом совпадала с нынешней. Самое главное, насыщенные кислородом массы воды, которые рано или поздно оказывались у дна, формировались в высоких широтах, как это происходит и сегодня.

После мел-палеогенового вымирания потребовалось несколько миллионов лет, чтобы выжившие млекопитающие выросли достаточно большими и смогли оказывать заметное влияние на растительную жизнь. Существует много попыток изобразить маленьких млекопитающих размером с крота, которые глядят из своих убежищ-норок на разлагающиеся трупы динозавров. В течение нескольких месяцев те млекопитающие, которые могли питаться падалью, жили как в раю. Но совсем скоро остались только кости, а затем исчезли и они, что заставило всех млекопитающих включиться в новую, до этого неизвестную в природе пищевую цепь и бороться за выживание. Это случилось до того, когда появилась трава, поэтому травоядные раннего палеоцена питались листьями и плодами, но никак не паслись на лугах. Кажется, тех, кто ел листья, тоже было немного. Строение большинства найденных зубов млекопитающих эпохи палеоцена доказывает, что их диета в основном включала насекомых, плоды и мягкие молодые побеги, но вряд ли жесткие листья. Некоторые

организмы поедали корни и клубни. Лишь во второй половине названной эпохи появляется больше обладателей зубов, пригодных для поедания листьев. Тем не менее работу эволюционного мотора, перезапуск которого произошел после мел-палеогенового вымирания, уже было не остановить. Затем, через 9 млн лет после вымирания, биосфера снова столкнулась с серьезной проблемой.

Позднепалеоценовый термический максимум

К началу кайнозоя Земля пережила по меньшей мере девять известных на сегодня массовых вымираний: первое приходится на кислородную катастрофу и периоды «Земли-снежка», вызванные этой катастрофой; второе — более 1 млрд лет назад — произошло в криогении; затем в хронологическом порядке следуют эдиакарское, позднекембрийское, ордовикское, девонское, пермское, триасово-юрское, мел-палеогеновое массовые вымирания. Удивительно, что причины этих событий были самыми различными: внезапное появление кислорода, сильное уменьшение его концентрации, появление хищников, помноженное на недостаток кислорода и выбросы сероводорода, и падение астероида. Однако в конце палеоцена, всего лишь через 9 млн лет после гибели динозавров, возникла новая опасность: увеличение концентрации метана в атмосфере, что вызвало одно из самых значительных резких изменений климата в геологической истории. Это событие получило название «позднепалеоценовый термический максимум».

Впервые данное явление открыли океанографы^[222], которые работали совсем над другой проблемой и не собирались изучать температурные аномалии палеоцена. Они пытались собрать новые сведения о мел-палеогеновом вымирании, проделывая для этого скважины в земной коре в глубоководных областях океана в рамках американской Программы глубоководного бурения. Но чтобы достичь ярусов мелового периода, сначала нужно пройти отложения эоцена и палеоцена. Пока сверлили скважину, чтобы добраться до конечной цели, попутно извлекали образцы пород верхних ярусов.

Когда образцы более молодых пород наконец осмотрели и были исследованы изотопы кислорода и углерода в раковинах крошечных одноклеточных протист-фораминифер, выяснилось, что полученные данные о температурах, а также об изотопах углерода-12 и углерода-13 как будто бы ошибочны, поскольку породы, извлеченные из нижних слоев, показывали более высокую палеотемпературу, чем в верхних слоях. Во времена палеоцена, как и сегодня, даже в холодной Арктике вода была на глубине холоднее, чем у поверхности. Однако цифры говорили совершенно противоположное: теплые глубинные воды и холодные верхние. За относительно короткий промежуток времени глубоководные области океана стали аномально теплыми.

В отложениях на границе палеоцена и эоцена обнаружилось аномально большое количество вулканического пепла^[223]. Как и пыль, относительно легкий вулканический пепел попадает на морское дно из атмосферы, однако появляется он в атмосфере в результате вулканической деятельности, а не из-за сильных ветров. Такое небывалое увеличение вулканического пепла в атмосфере и, соответственно, в отложениях могло произойти только благодаря резкому усилению вулканической деятельности, в данном случае около 58–56 млн лет назад. Дальнейшая проверка показала, что такое явление характерно для многих мест по всему земному шару, то есть это не аномалия какого-то одного места на морском дне.

Поздний палеоцен характеризуется тем, что в тропиках температура была стабильно высокой, тогда как в арктических и антарктических широтах температурные показатели заметно выросли. Вообще, в палеоцене показатели температур в морях между экваториальными и полярными регионами отличались значительно — на 17 °C (сегодня эта разница еще больше — 22 °C). Однако к началу эоцена различие это уменьшилось до 6 °C. Высокие широты потеплели, и тепловой обмен между экваториальными и полярными широтами сильно замедлился, а вместе с этим уменьшилось число и сила ветров. Мир стал очень тихим и очень жарким, как это, впрочем, уже много раз происходило в истории. И так

же, как раньше, произошло еще одно парниковое массовое вымирание.

Данные, полученные при исследовании изотопов углерода в отложениях на границе палеоцена и эоцена, также стали неожиданностью: они продемонстрировали непродолжительную отрицательную экскурсию, а такое возможно только при условии уменьшения объема растительности в биосфере, которое является признаком массового вымирания. В том же регионе, где бурили скважины по Программе глубоководного бурения США, другие палеонтологи обнаружили свидетельства катастрофической гибели придонных организмов (исследования были сосредоточены в основном на фораминиферах — они являются типичными обитателями придонной экосистемы). Являлось ли быстрое вымирание видов, приспособленных к холодным условиям, следствием лишь внезапного потепления? Результаты всех исследований, описанных выше, были опубликованы в начале 1990-х, а вскоре после этого японский палеонтолог Кунио Кайхо выпустил еще одну публикацию, в которой сообщалось, что судьба придонной биоты была решена не повышением температуры на больших глубинах, а резким падением уровня кислорода в тех областях океана. Весьма логичное заявление, ведь теплая вода зачастую бедна кислородом и пищевыми ресурсами.

Итак, в глубинных областях морей возникло неожиданное потепление, снизилась концентрация кислорода в воде, у поверхности вода также потеплела — что послужило этому реальной причиной? Столкновение Земли с астероидом во времена мел-палеогенового вымирания привело к серьезным изменениям в верхних слоях океана, и из-за этого в них погиб почти весь планктон, но глубоководный мир остался почти не затронут, если не считать сокращения пищевых ресурсов, поступающих сверху. Потепление глубоководных областей могло произойти из-за быстрого нагрева значительной площади морского дна, но такое возможно только в случае возникновения совершенно нового типа подводного вулканизма. У дна океана действительно существуют течения с очень высокой температурой, но они находятся у относительно узких срединно-океанических хребтов, где происходит образование новой океанической коры. Даже быстрое тектоническое движение, вызванное повышенной вулканической активностью, может создать потепления такого масштаба. Более-менее корректное предположение заключается в том, что в целом потепление придонных слоев океана возникло в результате интенсивного испарения в тропических широтах — это привело к тому, что вода стала более соленой и плотной, и затем эти более соленые и плотные водные массы переместились вдоль морского дна, в том числе в холодные области высоких широт.

В океане времен палеоцена не действовал один обычный механизм перемещения холодных, насыщенных кислородом поверхностных слоев ко дну: глубоководная термохалинная циркуляция — основной способ перемешивания океанических вод — работала диаметрально противоположным современному потоку океанических течений образом. Первыми жертвами этого стали фораминиферы — крошечные глубоководные организмы, которым был жизненно необходим кислород. Погибли многие их виды, и произошло это относительно быстро — в течение примерно 4000 лет. Впрочем, чтобы считать это событие массовым вымиранием, необходимо убедиться, что оно затронуло не только океан, но и сухопутных животных. Исследования продолжились уже на суше.

Глобальные парниковые изменения, которые привели к гибели океанических организмов, происходили и на суше^[224]. Открытие вымирания глубоководных форм заставило палеонтологов по-новому посмотреть на известные (и специально собранные) образцы сухопутных ископаемых палеоценовой эпохи, и вскоре стало понятно, что млекопитающие также пережили значительное потрясение. В дальнейшем более точные вычисления показали,

что вымирание на суше произошло в тот же период времени, что и в океане.

Геологическая летопись показывает, что данное событие привело, ни больше ни меньше, к новому этапу в развитии млекопитающих — современному. Во второй половине палеоцена уже существовали многочисленные (30 семейств по результатам изучения ископаемых) млекопитающие, но многие из них были небольшого размера, некоторые относились к несуществующим сегодня группам, включая переживших мел-палеогеновое вымирание, многих сумчатых, некоторые енотоподобные формы с копытами (странные это были звери — совершенно новые травоядные копытные животные, ставшие мясоедами в палеоцене). Существовали также настоящие насекомоядные и первые приматы — и те и другие очень малого размера. Однако к концу палеоцена возникли также и более крупные виды, некоторые — невероятно причудливые.

Питающиеся листьями пантодонты, размерами от собаки до быка, разделились на несколько эволюционных ветвей: полуводных существ типа бегемотов и животных, обитающих на деревьях или передвигающихся на четырех лапах по подлеску. Пантодонты были плотного телосложения, коротколапые, и следует признать, что по сравнению с современными травоядными они были крайне неуклюжими и передвигались очень медленно. Они являлись самыми крупными сухопутными животными палеоцена, но позже к ним присоединились другие травоядные — диноцераты, которые были еще больше, на голове у них было множество наростов и рога, выглядели они как огромные носороги.

В пограничных отложениях между палеоценом и эоценом наблюдается некоторое уменьшение количества видов, но затем, правда не сразу, появляются кости новых животных. Многие происходят от форм, более-менее привычных для нас. Сначала появились парнокопытные и непарнокопытные. Затем пришли те, кто ими питается — плотоядные формы, уже похожие на современных и относящиеся к современным таксономическим группам. И всем им пришлось адаптироваться к явлению, изменившему мировой климат. Урок прошлых массовых вымираний: новые морфологические формы появляются, только если им откроет дорогу значительная по масштабам гибель предыдущих организмов. В конце палеоцена так и случилось.

Наша коллега Франческа Макинерни предоставила замечательную обобщающую статью, написанную на основе ее исследований на северо-западе Америки, — это очень помогло нам описать позднепалеоценовый термический максимум. Во-первых, она отмечает, что такое явление чрезвычайно актуально для нас, людей, поскольку количество углерода, выброшенного в атмосферу (примерно 12–15 тыс. гигатонн), близко к тому, которое поступило в атмосферу в результате промышленных выбросов. Изменения, спровоцированные парниковыми газами, в период позднепалеоценового термического максимума привели к повышению общемировой температуры на 5–9 °С по сравнению с современным показателем. Само явление длилось приблизительно 10 000 лет. Растения того периода отличались и от более ранних, и от тех, что появились после него — во время позднепалеоценового термического максимума исчезли голосеменные. В регионе, который изучала Франческа Макинерни, по данным другого палеонтолога, Скотта Уинга из Смитсоновского института, растения того периода были в основном представлены формами, произраставшими в более низких широтах, а значит, при более высоких температурах. По окончании позднепалеоценового термического максимума ранние формы растений вернулись, вместе с ними вернулись и насекомые, существовавшие до температурного ада на Земле. Но не млекопитающие. Позднепалеоценовый термический максимум полностью изменил млекопитающих Северной Америки.

И еще одно: полярные шапки при таком значительном потеплении обязательно должны

растаять, а это приведет к подъему уровня океана. В этом и заключается опасность современного потепления, вызванного деятельностью человека, — таяние антарктических и гренландских льдов рано или поздно приведет к затоплению больших территорий пахотной земли. По прогнозам, самый высокий подъем воды придется на Южный Китай, а это один из самых густонаселенных регионов мира, в котором как раз на уровне моря располагаются рисовые поля.

Пастбища и млекопитающие постепенно охлаждающего кайнозойского мира

Начиная с эпохи эоцена и до начала миоцена (23,5 млн лет назад) мир постепенно охлаждался. В течение эоцена это похолодание почти не ощущалось, планета все еще оставалась большим тропическим лесом, а в том месте, где сегодня находится Северный полярный круг, жили крокодилы. Но в олигоцене процесс похолодания ускорился, началось становление нового климата, однотипный мировой климат постепенно сменялся на четкое разграничение времен года. В то же время в Антарктиде и, вероятно, в Гренландии стали формироваться гигантские пространства континентального льда. Нарастание ледяных пространств привело к быстрому и значительному понижению уровня моря. Во многих регионах высоких широт леса понемногу уступали место травяным лугам и саваннам. Происходили изменения и в атмосфере, что в дальнейшем имело серьезнейшие последствия для развития жизни на Земле.

Растениям нужен углекислый газ. Хотя за миллиарды лет существования нашей планеты количество углекислого газа то уменьшалось, то увеличивалось, но в общем все это были этапы одной общей истории с одной общей тенденцией — концентрация углекислого газа в атмосфере Земли постепенно уменьшалась, и планета постепенно охлаждалась (особенно за последние 40 млн лет). Впрочем, на эволюцию растений в кайнозое значительно серьезнее повлияло не изменение температуры. Возможно, намного более важным стало эволюционное образование более эффективного типа фотосинтеза — C_4 , который у многих растений заменил более древнюю форму — C_3 (цифры 3 и 4 в этих наименованиях показывают различные химические преобразования, возникающие, когда солнечный свет и углекислый газ соединяются при формировании живых клеток и тканей растения). Фотосинтез- C_4 необычайно быстро закрепился в растительном царстве, если судить по количеству растений, усвоивших этот тип преобразования. Растения, использующие фотосинтез- C_3 , оставляют изотопный показатель углерода, отличный от фотосинтеза- C_4 . Не только растения оставляют такие следы, но и животные, поедающие растения. Таким образом, мы можем узнать по останкам травоядных, каким типом растений они питались — с фотосинтезом- C_3 или C_4 , а возможно, и тем и другим.

Существуют две возможности определить, когда впервые возник фотосинтез- C_4 . Первая — молекулярные часы. Сравнивая геномы растений с разными типами фотосинтеза, генетики установили, что различия довольно велики, и механизм C_4 мог появиться не позднее чем 25 млн лет назад (мог и раньше — 32 млн лет назад). Однако палеонтологическая летопись показывает совершенно другие цифры — первые ископаемые растения с фотосинтезом- C_4 относятся к периоду 12–13 млн лет назад.

Появление фотосинтеза- C_4 не являлось единичным неожиданным экспериментом эволюции, который потом распространился на многие растения. На самом деле данный тип фотосинтеза возникал, скорее всего, около 40 раз у разных групп растений и в различные моменты истории их развития. Растения с фотосинтезом- C_4 приобрели способность противостоять огню и обезвоживанию, адаптировавшись, таким образом, к жаркому и сухому климату.

Для экологии самыми важными растениями с фотосинтезом- C_4 оказались травянистые растения, поскольку именно они являются основной пищей травоядных животных —

больших существ, пасущихся на лугах, и имеют большое значение для многих птиц, включая гусей, которые встречаются повсюду, даже на газонах городских парков. Снижение уровня углекислого газа, особенно за последние 20 млн лет, произошло во многом благодаря травянистым растениям с фотосинтезом-С₄ [225]. Многие травы не могут существовать под лесными деревьями, где прохладные и тенистые условия мешают их росту и развитию.

Впрочем, отступление лесов открыло новые годные для трав пространства. Первоначально полагали, что быстрая эволюция травянистых растений с фотосинтезом-С₄ стала возможной благодаря длительному снижению уровня углекислоты, однако существует и другая — новая — теория, согласно которой для бурного развития данного типа растений не менее важным, а возможно и более важным, является изменение лесного покрова планеты. Но что же вызвало уменьшение лесного покрова? Вероятно, лесные пожары.

Лесные пожары — незаслуженно игнорируемый фактор развития жизни на планете, покрытой растениями. Пожары, разумеется, зависят от уровня кислорода в атмосфере. В периоды с большими концентрациями атмосферного кислорода, например, в меловом периоде 320–300 млн лет назад, лесные пожары были, вероятно, постоянными. Если бы в тот период можно было посмотреть на Землю из космоса, то мы бы увидели, что атмосфера плотно задымлена, настолько плотно, что солнечный денек был редкостью. Такая дымовая завеса над большей частью материков серьезно влияла на глобальные температуры: большая часть дыма от лесных пожаров светлая с внешней, «космической», стороны и поэтому способна отражать больше солнечного света обратно в космос, чем при других обстоятельствах, а значит, менять альбедо — степень способности Земли отражать солнечные лучи.

Все эти явления создали цепь событий, кардинально повлиявших не только на мировой климат, но и на всю дальнейшую историю развития жизни. Увеличение содержания кислорода в атмосфере и его долговременный высокий уровень (более 30 %) в течение мелового периода спровоцировали большое количество лесных пожаров. Как сказано выше, это привело к снижению мировых температур, что в конечном итоге завершилось самым долгим за всю историю существования нашей планеты оледенением полярных областей. Хотя это оледенение не было общемировым, как в периоды «Земли-снежка», по времени оно было таким же долгим, как некоторые из них. Возможно, этот период полярного оледенения длился более 50 млн лет. За такие длительные периоды на Земле могли происходить самые важные события, например, освоение суши животными, эволюция новых, более развитых сухопутных растений, которые смогли приспособиться к жизни в высокогорных районах, до того не освоенных растениями. За такие интервалы возникали новые формы позвоночных, включая ранних рептилий, а за ними — и предков млекопитающих. Существует, однако, еще один аспект пожаров, который также мог повлиять на развитие растений, а следовательно, и на развитие жизни на планете в целом.

Новые исследования лесных пожаров в бассейне Амазонки доказывают, что пожары на не освоенных человеком территориях могут серьезно менять климатические условия, и это касается не только тропиков. Дэвид Бирлинг в книге *The Emerald Planet* («Изумрудная планета», см. главу 10) отмечает, что в течение апреля 1988 года дым от пожаров мешал формированию облаков над Северной Америкой, и это изменило режим выпадения осадков. Данный временной интервал стал для того региона одним из периодов суровой засухи и одним из самых сухих месяцев за весь XX век. В том же году произошло несколько крупных лесных пожаров, например, в июле 1988 года выгорели огромные территории вокруг Йеллоустоунского национального парка. Бирлинг предлагает по-новому оценить факт

распространения травянистых растений с фотосинтезом-С₄ — с точки зрения возникновения положительной обратной связи^[226].

Положительная обратная связь демонстрирует усиление экологического эффекта в одном определенном направлении. В современном мире потепление атмосферы вызывает усиленное таяние арктического льда, в связи с чем уменьшается площадь белой поверхности с высокой отражательной способностью. Покрытые белым льдом и снегом арктические моря отражают солнечные лучи обратно в космос, но таяние белого покрова приводит к увеличению площади темной морской воды, которая в таком случае начинает поглощать намного больше тепла, и моря теплеют. С потеплением морей лед начинает таять еще интенсивнее, и цикл продолжается. Положительная обратная связь заключается в том, что потепление ведет к еще большему потеплению.

Дэвид Бирлинг полагает, что положительная обратная связь в случае с лесными пожарами заключается в том, что пожары вызывают еще больше пожаров. Пожары меняют климат и провоцируют засухи, которые приводят к увеличению территорий, где возможно возгорание, и возникают новые пожары, — так замыкается круг.

Мы живем в эпоху, когда мировые температуры стремительно растут. Все возможные последствия для планеты пока не ясны, и еще менее предсказуем тот эффект, который может оказать новый, более теплый мир с более высоким уровнем моря на промышленность, население и развитие цивилизаций в целом.

Глава 18

Эра птиц: 50–2,5 миллиона лет назад

История развития жизни в школьных программах часто выглядит так: рыбы появились в эру рыб; некоторые рыбы выползли на сушу, и началась эра амфибий; амфибии затем дали жизнь рептилиям, и началась эра рептилий, которую еще называют эрой динозавров; заканчивается этот ряд эрой млекопитающих. Нетрудно догадаться, почему такой способ изложения истории стал обычным делом: люди любят все классифицировать, а последовательность «эр» выглядит очень удобной классификацией. Однако, как вы можете видеть, эры птиц-то нет! Ее никогда не выделяют в ряду прочих. Давайте же восполним этот пробел и попробуем описать исторический период, который определим как эру птиц^[227].

Эволюция птиц является одной из центральных научных проблем^[228]. Эта область исследований содержит ряд весьма спорных гипотез и противоречивых теорий. Всего можно выделить два основных направления: первая — птицы произошли от группы нединозавровых диапсид, но родственных той группе, от которой произошли динозавры; вторая — птицы являются непосредственными потомками динозавров. Представители второго «вероисповедания» даже прибегают к кладистике, чтобы подтвердить свою мысль: птицы это сильно изменившиеся динозавры^[229].

Целый ряд окаменелостей доказывает, что не только многие двуногие плотоядные динозавры похожи на птиц, поскольку они откладывали яйца, но и сами их яйца очень похожи на птичьи. Некоторые новые находки предоставляют еще более потрясающие свидетельства: у многих динозавров, живших и до и после появления археоптерикса, были конечности с перьями, подобные крыльям, то есть динозавры предпринимали не одну, а несколько эволюционных попыток научиться летать. Вопрос в том, были ли данные известные фоссилии когда-то настоящими динозаврами^[230].

Этот вопрос возник в 1996 году, когда палеонтолог Алан Федуччия занимался исследованием впервые обнаруженной окаменелости существа, которое он принял за загадочную птицу возрастом 135 млн лет, то есть появившуюся сразу после археоптерикса. Эта птица, ляонинорнис (*Liaoninornis* — «птица из Ляонина»), была совершенно не похожа на динозавра^[231]. У нее имелись развитая летательная мускулатура и грудная кость, сходная с аналогичной у современных птиц. Тем не менее ее нашли среди окаменелостей древних птиц, похожих на археоптерикса. Как эволюция могла так быстро проскочить столько этапов? Федуччия, таким образом, заключил, что птицы могли быть широко распространены и освоили разнообразные места обитания уже ко времени появления археоптерикса, а это временной интервал приблизительно 140–135 млн лет назад. Хотя такие птицы и были более развиты по сравнению с археоптериксом, все же они значительно уступали современным формам. Так где же они? Федуччия считает, что большинство из них вымерли вместе с динозаврами около 65 млн лет назад, а все предки современных птиц появились позднее, в интервале 60–53 млн лет назад, независимо от динозавров. Это так называемая теория большого взрыва относительно происхождения птиц^[232]. Федуччия и его коллеги рассматривают все сходства между птицами и динозаврами просто как проявление конвергентной эволюции — иными словами, естественный отбор параллельно создал схожие морфологические типы животных.

Данная теория относит возникновение современных птиц либо ко времени мел-палеогенового вымирания (65 млн лет назад), либо к периоду на несколько десятков

миллионов лет позднее. Разумеется, такая трактовка событий не является общепринятой на данный момент^[233]. За последнее десятилетие было найдено большое количество и разнообразие ископаемых птиц в породах мелового периода возрастом 130–115 млн лет, в основном в Китае. Некоторые из этих находок показывают, что развитию птиц с привычным для нас коротким хвостовым отделом позвоночника предшествовала эволюция форм с длинным хвостовым отделом^[234]. Кроме того, теория происхождения птиц от динозавров была подтверждена также открытием в Китае двух видов оперенных динозавров возрастом 145 млн и 125 млн лет, за которыми следуют более молодые ископаемые раннего мелового периода.

Большое внимание ученых сосредоточено на вопросах оперения. Почему вообще появились перья (функциональный аспект)? Как изначально развивались перья крыла, обеспечивающие полет? Во многом эти вопросы пытаются решить, применяя понятие экзаптации — каким образом определенная морфологическая характеристика приобретает дополнительную функцию или функции. Всем нам хорошо известны функции, которые выполняют перья в подкладках одежды и в спальнях мешках. Очевидно, что перья хорошо защищают от переохлаждения, но перья, которые сохраняют тепло, сильно отличаются от тех, что используются птицами для полета. Перья редко сохраняются в геологических отложениях, и поэтому, как это часто бывает в палеонтологии, окаменелости слабо влияют на решение вопросов о происхождении перьев, их первого появления и назначения. Хотя в последнее время палеонтологам очень часто помогают образцы из Китая. В данном случае это уникальные ископаемые останки динозавров с сохранившимися перьями^[235], а иногда (и не только в Китае) даже мягкие ткани^[236]. Однако находки окаменелостей птиц встречаются в научном сообществе без возражений и горячих споров нечасто^[237]. Эволюция полета (не просто планирование) — важная инновация, которую с успехом освоили членистоногие, рептилии, динозавры (в виде птиц) и млекопитающие, — была и остается благодатным полем для исследований^[238].

На сегодняшний день известно около 120 видов птицеподобных существ мезозойской эры, обитавших на всех континентах, кроме большей части Африки^[239]. Несмотря на эти постоянно обновляемые сведения, некоторые аспекты эволюции птиц, в том числе время происхождения и распространения современных видов птиц (*Neornithes*, то есть настоящих птиц)^[240], не получают однозначного определения.

Ископаемые птицы обнаружены в самых древних отложениях мелового периода (который делится на ранний мел — 145–100 млн лет назад, и поздний — 100–65 млн лет назад). Птицы раннего мела, должно быть, быстро эволюционировали и превратились в существ самых разнообразных форм и размеров. Некоторые были размером с ворону, с сильными клювами, например, конфуциусорнисы, к тому же обладавшие здоровенными когтями на крыльях. У других представителей птиц того времени, например, сапеорнисов, присутствовали длинные и узкие, как у чаек, крылья. Существовали маленькие птички, типа иберомезорниса, размером с воробья. Однако, несмотря на все свои развитые летные качества, птицы раннего мела были еще и зубастыми, как археоптерикс. Тем не менее разнообразие черепов, крыльев и лап показывает, что птицы раннего мелового периода уже различались по образу жизни и пищевым привычкам. Одни питались семенами, другие — рыбой, третьи — насекомыми, некоторые предпочитали сок растений, кое-кто — мясо. Строение крыльев и грудных клеток тех птиц свидетельствует, что вскоре после археоптерикса у птиц мелового периода развилась способность к полету, во многом уже сходная с умениями современных птиц.

Зубы оставались архаичной чертой птиц мелового периода. У всех современных птиц клювы имеют роговое покрытие, формы их очень разнообразны и приспособлены к различным типам пищи. Когда появилась первая беззубая птица? Этот вопрос также остается открытым. Возможно, ответ мы найдем на холодном антарктическом полуострове...

Современные птицы, ни у одной из которых нет зубов, произошли от своих зубастых предков в меловом периоде. Но это было не замещение одной формы другою, а сперва дополнительное новшество, поскольку ранние птицеподобные формы с зубами и длинными хвостами еще долгое время сосуществовали с процветающими группами крылатых рептилий мелового периода, в том числе с птерозаврами — крупнейшими летунами второй половины мела. Птицы с зубами вымерли лишь в конце мелового периода вместе со своими предками-динозаврами. По крайней мере, об этом можно судить по совокупности всех найденных ископаемых птиц из самого полного отложения позднего мела — в западной части США, в формации Хелл-Крик, которая является усыпальницей трицератопсов, тираннозавров, а также многочисленных примитивных птиц.

Выжившие после мел-палеогенового массового вымирания группы птиц относились к примитивным бескилевым. В подкласс бескилевых птиц входят крупные нелетающие птицы, например, страусы, нанду, казуары, а также гигантские формы, которых мы уже не увидим своими глазами — моа из Новой Зеландии и слоновые птицы-эпиорнисы с Мадагаскара, которых уничтожили люди в течение последней тысячи лет. Некоторые обычные птицы наших дней, в том числе водоплавающие утки, птицы сухопутного образа жизни, и лучшие летуны современности — настоящие птицы — ведут свое происхождение от бескилевых.

В формации Хелл-Крик и в схожих с ней породах Северной Америки на сегодня обнаружено всего 17 видов, из них семь принадлежат к самым древним из всех птиц видам, в их числе зубастые птицы группы гесперорнисов — ныряющие формы около 1 м в длину. Среди найденных образцов есть как меньшие формы, так и крупные летающие птицы времен юры и мела, и это со всей определенностью говорит о том, что значительная доля эволюционного разнообразия видов птиц имела место еще до гибели динозавров.

Действительно, «сообщество» птиц из формации Хелл-Крик показывает значительное преобладание морских обитателей, и это неудивительно, поскольку рядом с этим местом в меловом периоде находилось внутреннее море, разделявшее североамериканский континент на два субконтинента. Ни одна из групп, известных по данной формации, не дожила до палеогена, и их присутствие в Хелл-Крик (последние 2–3 млн лет маастрихтского яруса позднего мела) подтверждает, что во время мел-палеогенового вымирания древние формы птиц в самом деле погибли^[241]. Но вот что не дает покоя: хотя многие птицы из североамериканских отложений являются представителями «продвинутого» в морфологическом смысле этапа эволюции, ни один род не может быть однозначно причислен к настоящим птицам. Последние известны со времен позднего мелового периода, хотя в тот момент их разнообразие и количество типов строения тела уступали современным птицам. Ископаемые из формации Хелл-Крик тем не менее помогают нам лучше понять масштаб гибели птиц в мел-палеогеновом вымирании.

Птицы принадлежат к тем позвоночным, которым суждено было пережить последствия падения Чуксулубского астероида. Пожары на большей части лесных территорий в первые дни после катастрофы, кислотные дожди, полгода темноты, а значит, и голода, уничтожение практически всех экосистем, в том числе в морях и пресных водоемах, — условия были ужасающими. Даже не пострадавшие физически глубоководные экосистемы в дальнейшем были затронуты нехваткой пищевых ресурсов, поступающих сверху, — мертвого планктона и крупных погибших животных. На суше выживаемость зависела от размеров: чем крупнее был

организм, тем меньше у него оставалось шансов выжить. Но птицы-то не принадлежали к крупным организмам...

Поскольку птицы обладали способностью быстро перемещаться, в том числе летать, то логично было бы предположить, что их шансы на выживаемость гораздо выше, чем у нелетающих животных. К сожалению, птицы, чьи кости легкие трубчатые, оставляют меньше окаменелостей, так что собрать образцы бывает нелегко. Но благодаря упорству исследователей у нас теперь есть достаточно материала, чтобы, по крайней мере, образованная часть публики могла представить себе судьбу птиц в эпоху перехода от мезозоя к кайнозою, прочитав те страницы геологической летописи, которые выжжены падением астероида.

К концу мелового периода время существования птиц на планете превышало временной интервал от столкновения Земли с Чуксулубом и до наших дней.

Великое разнообразие птиц

Временные интервалы развития видового разнообразия птиц можно изучать с помощью не только ископаемых, но и анализа ДНК. В первом десятилетии XXI века было проведено несколько независимых исследований ДНК современных видов ^[242], и в результате появилось некоторое число версий «эволюционного дерева» птиц (предположительно произошедших от выживших в мел-палеогеновой катастрофе древних форм). Новые версии генеалогического дерева птиц преподнесли ученым сюрпризы. Например, ближайшими родственниками обычных пресноводных ныряющих птиц-поганок оказались... фламинго! Колибри — особая форма козодоев, а соколы по происхождению ближе певчим птицам, а не прочим хищникам типа орлов. И хотя уже одни эти факты весьма неожиданны, существует кое-что еще более поразительное.

Представьте себе, новая модель происхождения видов птиц помещает отряд тинамуобразных на одну ветвь с нелетающими — страусами, эму и киви. Важность этого открытия в том, что, оказывается, неспособность к полету развивалась у этой генеалогической ветви дважды, либо тинаму заново обрели способность летать, хотя произошли от нелетающих предков. И еще: новое «дерево» демонстрирует близкородственные отношения между воробьиными (самым крупным отрядом среди всех птиц) и попугаями. При этом, несмотря на все эти удивительные открытия, до сих пор не выяснено, когда же произошло разделение птиц на два основных подкласса: бескилевых и новонёбных.

Несколько основных современных групп настоящих птиц, как выяснилось совсем недавно, возникли в конце мелового периода. Эти сведения были получены в результате изучения останков ископаемого вегавис, найденных на острове Вега у берегов Антарктиды. Настоящие птицы разделились на бескилевых (тинаму, киви, страусы, эму) и новонёбных (все остальные птицы). Момент возникновения первичного разнообразия новонёбных также не определен. Наиболее правдоподобным является предположение, что первоначальное разделение настоящих птиц произошло перед мел-палеогеновым вымиранием. Но верно ли это предположение? И если да, то насколько раньше вымирания? Выше мы уже упоминали о группе специалистов (к ним относится, например, Алан Федучча), уверенных, что современные птицы появились только после мел-палеогеновой катастрофы. Также существуют теории, согласно которым под сомнение ставится факт распространения новонёбных до и после гибели других динозавров.

Таким образом, новые образцы с острова Вега стали решающим событием. Вега — маленький островок к северу от острова Джеймс Росс, на котором до этого также нашли останки птиц, послужившие важным ключом к пониманию эволюции птиц. Находки на острове Вега дали первое свидетельство того, что современные птицы существовали в конце мелового периода одновременно с не-птичьими динозаврами.

Наконец, еще один вопрос уже долгие годы мучает палеонтологов. В середине кайнозоя птицы снова попытались стать гигантскими хищными динозаврами. Самой знаменитой из таких попыток были «ужасные птицы», о численности которых можно судить по сведениям, приведенным ниже. Разумеется, существовала жесткая конкуренция между такими птицами и новыми тогда группами предков современных хищных млекопитающих — псовых, кошачьих, медвежьих, куньих.

Эволюция больших нелетающих птиц (бескилевых), существующих сегодня, — страусов, нанду, казуаров и других — всегда представлялась возвратом к двуногим формам

динозавров. Но поскольку такие птицы, естественно, не могли прыгать с острова на остров или пересекать большие водные пространства, как это делают летающие птицы, то давно устоялось мнение, что все группы нелетающих птиц возникли независимо друг от друга. Так как большинство таких птиц обитают сегодня на южных материках, которые в мезозойскую эру были объединены в один суперконтинент, то подразумевается, что страусы Африки, нанду Южной Америки и казуары Австралии возникли в результате раскола Гондваны. Однако одним из многочисленных сюрпризов ДНК-анализа оказалось то, что эти нелетающие бескилевые птицы на самом деле развились как отдельные группы *не после, а до* того, как потеряли способность к полету^[243].

Африка и Мадагаскар — одни из первых областей Гондваны, отделившиеся от основного суперконтинента, поэтому можно было предположить, что ранняя изоляция этих участков суши приведет эволюцию к созданию самых древних бескилевых — африканских страусов и слоновых птиц Мадагаскара. Из-за близости Мадагаскара к Африке казалось вероятным, что страусы и слоновые птицы должны быть близкородственными, но при этом сильно отличаться от прочих нелетающих бескилевых, включая нанду и новозеландских моа (последние, так же как и существующие сегодня киви, развивались в собственной изоляции). Но, как уже упоминалось, изучение ДНК дало неожиданные результаты.

Мадагаскарские слоновые птицы оказались ближе к новозеландским моа и киви, чем к африканским страусам. Эти данные подтверждают гипотезу, что группа, в которую входили слоновые птицы и их новозеландские родичи, обрела генетическую самостоятельность до того, как потеряла способность к полету.

Ныне живущие бескилевые являются единственными крупными динозавроподобными птицами прошлого. Самые большие сухопутные птицы, на сегодняшний день вымершие, демонстрировали возврат к строению тела, характерному для двуногих плотоядных динозавров мезозоя. Известные под научным названием «фороракосы» («ужасные птицы»), эти существа появились в Южной Америке примерно 60 млн лет назад и исчезли около 2 млн лет назад, в период первого плейстоценового наступления ледников. Некоторые из этих птиц перебрались в Северную Америку, а в Южной они оставались главными хищниками в течение почти всего кайнозоя. В современности нет существ, подобных фороракосам, и это прекрасно.

Новые сведения, полученные в 2010 году методами компьютерной томографии, помогли нам по-новому увидеть жизнь и гибель этих существ. Исследование показывает, что большие клювы этих чудовищ были полыми, что стало для ученых полной неожиданностью. Такой клюв должен быть хрупким и слабым, его легко сломать боковым воздействием. Скорее всего, они использовали клюв как топор, а настигая жертву, полагались на свои мощные лапы с огромными когтями.

Как и у большинства нелетающих птиц, крылышки у фороракосов были маленькие и короткие, но лапы — длинные, сильные, с когтистыми пальцами. Мускулатура лап позволяла развивать большую скорость при беге. Было установлено, что некоторые виды «ужасных птиц» могли бегать со скоростью 112 км/ч по плоской местности, а в южноамериканской пампе таких мест полно. В беге они могли бы соперничать, скажем, с гепардами. Сочетание высокой скорости передвижения, большого клюва и жутких когтей на мощных лапах делали фороракосов более чем успешными хищниками.

Из всех птиц фороракосы имели самый большой мозг, а отсюда напрашиваются неприятные выводы. Недавно стали известны результаты наблюдений над интеллектом африканских серых попугаев: нейрофизиологи и психологи считают, что мы серьезно недооцениваем разумность птиц. Хотя специалисты признают наличие когнитивных

способностей у приматов, птицы в целом — и фороракосы, возможно, тоже — являются одними из самых разумных живых существ, когда-либо живших на нашей планете.

Глава 19

Появление человека и десятое массовое вымирание: 2,5 миллиона лет назад — современность

Было время, когда на страницах некоторых книг высказывались предположения, что мир, возможно, вступает в эпоху еще одного массового вымирания (в двух книгах соавтора данного сочинения Питера Уорда также можно обнаружить подобные утверждения, см., например, *Rivers in Time* («Реки времени»))^[244]. В книге Ричарда Лики *The Sixth Extinction* («Шестое вымирание»)^[245] было представлено подробное описание пяти «великих массовых вымираний» (о которых мы уже рассказали выше), в результате каждого из которых погибало более 50 % всех существовавших в соответствующий период видов: ордовикское, девонское, пермское, триасовое и мел-палеогеновое. В нашей новой истории развития жизни на Земле мы берем на себя смелость утверждать, что всего произошло 10 крупных массовых вымираний, масштабы которых позволяют отделить их от малых вымираний, например, от события гибели видов в период позднепалеоценового термического максимума или нескольких случаев частичной гибели видов в юрском или меловом периодах. Итак, 10 крупных массовых вымираний:

1. *Кислородная катастрофа*. Это событие, возможно, было самым опустошительным, если говорить о процентном соотношении погибших и выживших видов — отдельно и таксономическими группами. Кислород оказался смертельно ядовитым почти для всех видов микроорганизмов в соответствующий период времени. Если учесть, что это событие отчасти совпало с первым периодом «Земли-снежка», то становится понятно, насколько оно было ужасным. Представьте, что вы идете по улице, и вдруг воздухом становится невозможно дышать. Воздух есть, но он совсем другой! Вот что испытали те водные организмы, которые создали жизнь на Земле. Океан вдруг наполнился кислородом.

2. *Серия вымираний в криогении*. Период последовательных событий «Земли-снежка» в позднем протерозое. Океан и сушу сковал толстый грязный лед. Фотосинтез почти прекратился. Богатая и разнообразная жизнь на суше и в море (причем в море намного богаче и разнообразнее) погибла. Это был удар не просто по разнообразию видов, но по самой биомассе.

3. *Вымирание в позднем эдиакарии*. Погибали строматолиты, цианобактериальные маты и, в особенности, вендобионта — «эдиакарский сад». Его населяли прожорливые и, что главное, способные к самостоятельному передвижению животные, которые ели все подряд на своем пути, внося страх и смуту в экосистемы малоподвижных микроорганизмов, покрывавших дно океана и поверхность суши.

4. *Вымирание в позднем кембрии — кембрийский положительный сдвиг изотопа углерода*. Гибель большинства трилобитов, многих видов «странных чудес» из сланцев Бёрджесс и пр. Очень важно помнить, что впоследствии полностью поменялись морфологические типы трилобитов, которые эволюционировали из форм с примитивными глазами и сегментацией, не позволяющей сворачиваться в шар и тем самым спастись от хищников. В результате этого события пострадали первые по-настоящему крупные подвижные и покрытые панцирем плотоядные организмы — головоногие наутилоиды. Также имели место заметные химические изменения.

5. *Ордовикское массовое вымирание*. Глобальное вымирание тропических видов. Было

вызвано похолоданием и, возможно, изменением уровня моря.

6. *Девонское массовое вымирание*. Придонные организмы и другие обитатели моря. Было ли это первым парниковым вымиранием?

7. *Пермское массовое вымирание*. Парниковое массовое вымирание на суше и в морях.

8. *Триасовое массовое вымирание*. Парниковое массовое вымирание на суше и в морях.

9. *Мел-палеогеновое массовое вымирание*. Гибель видов в результате парникового эффекта и столкновения Земли с крупным космическим объектом.

10. *Плейстоцен-голоценовое массовое вымирание*. Началось примерно 2,5 млн лет назад и продолжается до сих пор. Причины — климатические изменения и антропогенные факторы.

Последний пункт должен вызывать у нас наибольшее беспокойство. Другие случаи вымираний, особенно парниковые, должны были нас испугать, но этого не произошло, вероятно, оттого, что они были очень и очень длительными. Медленная гибель, и... коснулась она не нас. Мы довольно устойчивы к вымираниям. Мы выживем. Но будем ли счастливы? На опустевшей планете? Окруженные одомашненными животными и растениями, чьи «прыгающие» гены перемещаются как им вздумается и вполне могут запустить еще один непредсказуемый кембрийский взрыв.

На пути к десятому вымиранию

В 2010 году в США из Эфиопии прибыл один из самых знаменитых музейных экспонатов — ископаемые останки первого гоминида по имени Люси^[246]. От Люси мало что осталось, по правде говоря: около 40 % скелета, реконструированный рост — примерно 1 метр. Тем не менее Люси о многом рассказала ученым^[247].

Половой диморфизм — термин, означающий, что у вида наблюдаются два разных типа строения тела — мужской и женский. Он, безусловно, относится не только к гоминидам, и больший по размеру представитель двух полов — не обязательно мужская особь. У многих животных, например, некоторых головоногих (но не у наутилусов, что занятно), самки крупнее. Конечно, ведь для производства яиц требуется больший объем тела, чем для выработки мужских половых клеток. У гоминид, однако, начиная с шимпанзе и заканчивая человеком, крупнее самец. Диморфизм у человека хорошо проявляется в цифрах. Например, рост самок (женщин) составляет 90–92 % от роста самцов (мужчин), в зависимости от расы. Вид, к которому относилась Люси, имел другие характеристики.

Люси — единственный представитель своего вида, известный на текущий момент. Ее вид, австралопитек афарский (*Australopithecus afarensis*), на сегодняшний день намного лучше изучен по сравнению с тем, что мы знали (или, скорее, не знали) о нем в 1974 году, когда группа Дона Джохансона обнаружила Люси. Среди наиболее свежих находок — скелет самца того же вида, достаточно хорошо сохранившийся, чтобы можно было рассчитать его рост при жизни. Его назвали Кадануумуу, что означает «Большой человек», его рост составлял 1,5 метра. Подбородок Люси оказался бы как раз на уровне его пупка.

Если исходить из того, что Люси и Большой человек относятся к одному виду, то получается, что рост самок этого вида составлял всего 70 % от роста самцов. Из этого можно сделать важные выводы как в поведенческом плане, так и в культурном. В 2012 году антрополог Патриция Крамер из Вашингтонского университета представляла подробный доклад^[248] о соотношении скорости ходьбы у мужчин и женщин в зависимости от длины ног. В частности, она сообщила, что оптимальная скорость Большого человека при ходьбе была 4,6 км/ч, а у Люси намного меньше, всего 3,7 км/ч. Чтобы идти в ногу с самцом, самкам приходилось прикладывать очень много усилий, а сбивающееся дыхание, да еще в мире, полном хищников, — не самая лучшая стратегия выживания. Поэтому Крамер предположила, что, как и шимпанзе, самцы и самки гоминид проводили большую часть времени отдельно друг от друга, занимаясь поисками пищи.

Другие африканские находки также внесли изменения в некоторые давно сложившиеся представления. Люси и представители ее вида постоянно изображаются прямоходящими, то есть на двух ногах, на фоне живописных плейстоценовых степей с островками леса. Но однажды были найдены лопатки самки афарского австралопитека (более раннего происхождения, чем останки Люси, — примерно на 100 тысяч лет старше), по которым можно определить, что представители данного вида были, скорее, обитателями деревьев, хотя и хорошо приспособленными к хождению по земле. Вопрос, как много времени проводили наши далекие предки на деревьях, очень бурно обсуждается^[249], во многом потому, что до обнаружения этих лопаточных костей никаких оснований предполагать, что данный вид был приспособлен к жизни на деревьях, не существовало. Новые данные заставляют нас думать, что, по-видимому, австралопитеки спустились с деревьев не так рано, как нам бы хотелось считать.

Хотя гоминиды — относительно новые обитатели Земли, в целом наш отряд — приматы

— появился уже в меловом периоде. Наш предок пургаториус, на счастье, пережил мел-палеогеновое массовое вымирание. Некоторые из самых ранних приматов относились к лемурам. Более развитые приматы — первые настоящие антропоиды (к которым сегодня также относятся человекообразные обезьяны и человек) — появляются в геологических отложениях в Азии, датированных 45 млн лет назад. Самый древний представитель настоящих антропоидов, названный «эосимия», был обнаружен в Китае.

Приблизительно 34 млн лет назад появились более умные, крупные и, вероятно, более агрессивные обезьяны. Одна из них — катопитек — имела размер черепа, как у современной маленькой обезьянки, относительно плоскую морду (лицо), и это был первый представитель приматов, строение зубов которого совпадало с тем, что мы видим у современного человека: два резца, один клык, два премоляра и три моляра с каждой стороны челюсти. Теперь мы имеем хорошее представление о нашем собственном генеалогическом древе, а именно о том, где и когда впервые появились «люди» — о зарождении африканских австралопитеков.

Палеоантропологи проделали огромную работу, пытаясь выяснить, где и когда возник наш вид. Семейство гоминид, к которому относится человек, вероятно, появилось 5–6 млн лет назад. С той поры в нашем семействе развились девять видов, хотя это число спорно, поскольку со временем обнаруживаются новые кости и возникают новые интерпретации.

Самым важным для нас потомком древних гоминид является первый представитель нашего рода *Ното* («человек») — вид, названный «человек умелый» (*Homo habilis*) за его способность использовать различные орудия. Возраст его останков — 2,5 млн лет. От этого существа примерно 1,5 млн лет назад произошел «человек прямоходящий» (*Homo erectus*), а от него — наш вид, «человек разумный» (*Homo sapiens*). Наш вид мог произойти либо непосредственно от «человека прямоходящего» около 200 тысяч лет назад, либо через переходную форму «человек гейдельбергский» (*Homo heidelbergensis*). Далее в нашем виде развились несколько самостоятельных разновидностей.

Одни ученые считают, что неандертальцы — разновидность, другие утверждают, что это — отдельный вид «человек неандертальский» (*Homo neanderthalensis*). Анализ ДНК неандертальцев является по-настоящему интригующей областью новейших палеоантропологических исследований. В частности, последние данные свидетельствуют^[250], что генеалогические ветви современного человека и неандертальца разошлись до возникновения современных людей и нашей существующей сегодня ДНК. Неандертальцы не являются ни нашими предками, ни нашими потомками, но и они, и мы произошли от общего вымершего предка, который отличался от обоих видов^[251].

Формирование нового вида рода «человек» происходило, когда небольшая группа гоминид оказывалась по каким-то причинам отделенной на несколько поколений от общей популяции. В 1960–1970-х годах существовало мнение, что современный человек появился в результате одновременной эволюции параллельно существующих на разных континентах популяций — разные группы «человека прямоходящего» развились в «человека разумного» независимо друг от друга в различных частях планеты. Сегодня эта теория выглядит просто забавной.

Геологическая летопись говорит, что самый древний представитель нашего вида — его часто называют «современный», чтобы отличить от более древних форм «человека разумного», — жил 195 тысяч лет назад на территории современной Эфиопии. Неизвестно, да и неважно, являются ли останки этого первого современного человека «местными» по происхождению или он случайно забрел туда из реального места своего возникновения. Очень скоро компания наших предков распространилась из Эфиопии до самых дальних южных районов африканского континента, а потом и на север, проложив себе в дальнейшем

путь из Африки в Евразию. Так современные люди расселились по всему земному шару^[252], отделившись от других видов своего рода, и приспособились к самым разнообразным условиям существования. Жители северных широт, где мало солнца и много снега, обладают качествами, как физиологическими, так и психологическими, которые значительно отличаются от качеств людей африканских равнин. Количество людей увеличивается и эволюционирует, приобретая новые качества и разновидности, и все это — в рамках одного вида.

Последний ледниковый период

Климатические изменения, происходившие на планете последние 2,5 млн лет, выглядят как последовательная смена долгих периодов холодного климата, сопровождаемых оледенением больших территорий и понижением уровня моря, и относительно коротких периодов потепления. Предполагалось, что подобные чередования — результат изменения орбиты Земли, о котором уже шла речь в одной из предыдущих глав, а первое упоминание зафиксировано в трудах Милутина Миланковича. Кроме того, было принято считать, что климатические изменения — долгий процесс, однако когда стал доступен анализ ледяных кернов и, следовательно, исследования климата стали более достоверными, начал формироваться новый взгляд на климатические процессы.

Ледяные керны и другие источники информации об истории климата, например, изотопный анализ образцов морского дна, показывают, что за последние 800 тысяч лет межледниковые интервалы — периоды потепления между значительно более холодными отрезками времени — длились в среднем примерно 11 тысяч лет. Текущий межледниковый период потепления длится уже более 11 тысяч лет, по некоторым оценкам — 14 тысяч лет. Означает ли это, что в данный момент наступают ледники? Ответ — категоричное «нет», и причин тому несколько.

Прежде всего, на климат влияет не только состояние орбиты. Геологические исследования подсказывают, что в период 450–350 тысяч лет назад происходило потепление между ледниковыми периодами, которое длилось намного дольше 11 тысяч лет. Тот период потепления совпал с минимальным эксцентриситетом орбиты. Такой же показатель эксцентриситета наблюдается и сегодня, а значит, нынешний период потепления может продолжаться еще тысячи или даже десятки тысяч лет. Или может закончиться в любой момент.

Плейстоценовая эпоха испытала серьезное изменение климата, начавшееся 2,5 млн лет назад. Обширные холодные пространства, покрытые травой, и тундры, возникшие в последний период потепления, покрылись льдом. Год за годом накопление льда привело к образованию ледников, которые медленно распространялись на юг. Вскоре континентальные ледники начали срастаться с горными ледниками, заключая сушу в объятия ледяной — и ледниковой — зимы.

Планета не полностью оказалась подо льдом, как это представляют популярные постапокалиптические фильмы. По-прежнему существовали тропики и коралловые рифы, теплый климат, приятный в любое время года. Впрочем, не было такого места на Земле, где бы так или иначе не проявилось воздействие оледенения. Произошло глобальное изменение климата, поэтому изменились режимы ветров и выпадения осадков. Даже те регионы, которые находились далеко от ледников, претерпели ощутимые климатические изменения: где-то похолодало, где-то, наоборот, потеплело, местами стало значительно суше. Непосредственно перед ледниками расположились громадные ледяные пустыни и полупустыни, тогда как регионы, которые обычно были сухими, например, Сахара в Северной Африке, оказались залиты дождями. Напротив, регионы, где до начала данного ледникового периода климат был относительно стабильным на протяжении десятков миллионов лет (большие тропические леса бассейна Амазонки и экваториальной Африки), испытали продолжительное похолодание и засуху, которые были настолько интенсивными, что обширные джунгли превратились в отдельные небольшие леса, окруженные широкими сухими саваннами.

Расселение человека по земному шару

Многие из описанных выше климатических изменений происходили в период освоения человечеством земных территорий. Примерно 35 тысяч лет назад произошел последний эволюционный скачок, и современный человек окончательно сформировался. Шаг за шагом современные люди обживали планету. Медленно, но настойчиво они осваивали все новые регионы. Не за один век. Это продвижение человека на новые участки было не похоже на колонизацию европейцами Северной Америки, когда за пару-тройку веков девственные леса и прерии уступили место окультуренным полям и городам из стекла и бетона. Данное завоевание было медленным. Даже отдаленная островная Австралия оказалась освоенной человеком разумным 35 тысяч лет назад. Однако в тот период все еще оставались места, куда не ступала нога человека: Северная Азия и обе Америки.

Первыми — в палеолите около 30 тысяч лет назад — на обширную территорию, которую сегодня мы называем Сибирью, пришли охотники на крупную дичь. Они принесли уже освоенные методы выживания в суровом климате: каменные орудия. Эти предметы восточных сибиряков отличаются от тех, что были в ходу у европейских поселенцев того времени, и точно испытали влияние культур Юго-Восточной Азии. Основным их ремеслом являлась охота на крупных животных, о чем можно судить по способу обработки больших каменных наконечников копий.

Прибытие первых людей в Сибирь совпало с периодом небольшого потепления, следовавшего за холодным интервалом, что и могло послужить причиной для освоения в общем недружелюбной местности. Однако вскоре после их прибытия снова похолодало, и 25 тысяч лет назад на Земле все еще продолжался очередной затяжной ледниковый период.

В Западной Европе и Северной Америке огромные ледниковые покровы неумолимо продвигались к югу, закрывая целые регионы льдом толщиной 1,6 км. В Сибири тем не менее было так сухо, что лед не формировался. Люди продолжали постепенно продвигаться на восток по этой безлесной замерзшей территории. Поскольку деревьев было совсем мало, для постройки убежищ использовались шкуры и рога, шли в дело даже кости мастодонтов и мамонтов — самой крупной добычи. Эти люди по необходимости стали замечательными охотниками на крупного зверя.

Человечество добралось и до Берингии (палеогеографическая область, где в прошлом находился перешеек, соединявший Азию и Северную Америку), произошло это, вероятно, 30–12 тысяч лет назад. Континентальные льды, покрывавшие большие территории Северной Америки, достигли в тот период своего максимума. Увеличение ледников привело к снижению уровня моря, и обнажились обширные сухопутные пространства, обеспечившие возможность межконтинентальной миграции как для животных, так и для человека. Когда же лед наконец начал таять, уровень моря снова поднялся. 14 тысяч лет назад континентальные ледники, покрывавшие большую часть Канады и значительную часть нынешних США, находились в процессе медленного, но неуклонного таяния под воздействием постепенно повышающейся температуры.

Вскоре, однако, таяние ускорилось за счет еще одного важного события. Многочисленные айсберги, которые накапливались в океанах у восточного и западного побережий Северной Америки в период около 18–14 тысяч лет назад, провоцировали образование холодных ветров и охлаждение воды, что также приводило к поддержанию холодного климата на суше. Но в определенный момент постепенное таяние привело к тому, что лед, нараставший на суше, перестал поступать в моря в виде отколовшихся айсбергов.

Ветра вдоль побережий потеплели, и лед на суше стал таять еще быстрее.

Тающий фронт ледников, должно быть, представлял собой весьма суровую местность, поскольку отступление льда характеризовалось непрекращающимися ветрами. Ветер был так силен, что образовывал высокие наносы песка и разного мусора, которые превращались в отложения, называемые лёссовым грунтом. Кроме того, ветер приносил семена, и вскоре неустойчивые почвы у границ ледников, несмотря ни на что, покрылись первыми растениями. Сначала это были папоротники, а затем и более развитые формы. Ивы, можжевельники, тополя и разнообразные кустарники были теми растениями, которые начали трансформировать последствия долговременного ледникового режима. После распространились и другие растительные сообщества. Например, в более мягких условиях запада преобладали еловые леса, в более холодных срединных землях господствовали тундровые растения и вечная мерзлота. Так или иначе, ледник везде отступал, и везде его преследовала по пятам тундра, а за ней приходил еловый лес.

Большие еловые массивы Северной Америки перемежались областями с травой и кустарниками. Такой ландшафт никак не походил на дремучие леса, кое-где сохранившиеся на северо-западе Северной Америки — не было тогда ни густого подлеска, ни гниющего бурелома, которые могли бы сделать такой лес совершенно непроходимым для крупных зверей и человека.

К югу от североамериканского ледника даже в течение ледникового периода сохранялись разнообразные экосистемы: лесотундра, травянистая степь, пустыня — и множество растений, поддерживавших огромные стада гигантских млекопитающих. Когда ледниковый период закончился и климат во многих регионах Земли стал намного мягче, стали интенсивно разрастаться человеческие сообщества.

Десять тысяч лет назад люди успешно колонизовали все континенты, за исключением Антарктиды, а адаптация к различным условиям обитания привела к образованию вариантов вида, которые сегодня мы называем человеческими расами. Долгое время считалось, что такой очевидный расовый признак, как цвет кожи, является адаптацией исключительно к количеству солнечного тепла и света. Недавние исследования показали, что большая часть того, что называется расовыми признаками, возможно, просто результат полового отбора, а не стремление соответствовать среде обитания. Однако происходили и другие процессы приспособления, многие из которых не проявляются очевидным образом в морфологии тела.

Африку всегда ценили за то, что в ней водится множество крупных млекопитающих. Нигде на Земле нет такого разнообразия крупных травоядных и плотоядных, как на этом континенте. Тем не менее этот рай не был исключением, он всего лишь соответствовал норме — еще совсем недавно все пастбища умеренных и тропических областей земного шара были похожи на Африку. К сожалению, из-за одного необычного явления значительное количество видов крупных млекопитающих резко сократилось за последние 50 тысяч лет.

Разумеется, в первую очередь исчезновение крупных животных интересно тем, кто изучает случаи вымирания, однако следует обратить особое внимание на тот факт, что гибель крупных животных приводит к значительно более масштабным последствиям для экосистем, чем вымирание более мелких организмов. Вымирание в конце мелового периода имело большое значение не потому, что погибли многие мелкие млекопитающие, а потому, что исчезли очень крупные сухопутные динозавры. Именно их уход перестроил все среды обитания на суше. Таким же образом исчезновение большинства видов крупных млекопитающих по всему миру на протяжении последних 50 тысяч лет является событием, смысл которого мы начинаем полностью понимать только сегодня и последствия которого будут иметь значение еще миллионы лет в будущем.

Особенно следует отметить период позднего плейстоцена примерно 15–12 тысяч лет назад, когда вымерло очень много видов крупных млекопитающих Северной Америки. Исчезли по меньшей мере 35 родов, а значит, как минимум, такое же количество видов. Шесть из них обитали на планете повсеместно (например, лошади, которые вымерли в обеих Америках, но продолжали существовать в Старом Свете). Большинство вымерших видов принадлежали к многочисленным таксономическим группам — 21 семейству и семи отрядам. Единственная характеристика, которая объединяла все эти весьма разнообразные и генетически далекие друг от друга виды, — большие размеры, хотя этот признак присутствовал не у всех вымерших организмов.

Самым известным, хрестоматийным, примером животных, исчезнувших в результате того вымирания, были представители отряда хоботных — мастодонты и гомфотерии, а также мамонты. Все они были близкими родственниками современных слонов. Самым распространенным был американский мастодонт, ареал которого занимал всю не занятую ледником территорию материка, от побережья до побережья. Это был самый многочисленный вид в лесных областях восточной части континента Гомфотерии — существа, не похожие ни на одно из ныне существующих, — были широко распространены в Южной Америке, хотя их останки как будто обнаружили и во Флориде. Мамонты, обитавшие в Северной Америке, включали два вида: колумбийские мамонты и шерстистые мамонты.

Другой знаменитой группой крупных травоядных, обитавших в Северной Америке в ледниковый период, были гигантские ленивцы и их близкие родичи-броненосцы. Всего в этом отряде вымерло семь видов, сохранился только один род броненосцев на юго-западе североамериканского континента. Крупнейшим представителем данной группы животных был гигантский ленивец, обитавший, в отличие от современных ленивцев, на земле, а не на деревьях. Самые маленькие из этих животных были размером с черного медведя, а самые большие — с мамонта. Останки гигантских ленивцев среднего размера часто находят в битумных ямах в районе современного Лос-Анджелеса, последний из них, не менее знаменитый ленивец Шаста, был размером с большого медведя. Невероятно эффектно выглядел еще один представитель той же группы — глиптодонт. У него был тяжелый панцирь, напоминающий черепаший. Вымер и род броненосцев, сохранился только девятипоясный броненосец.

Парнокопытные и непарнокопытные животные также вымирали. Из непарнокопытных следует назвать лошадь — исчезло десять видов, и тапиров — два вида. Среди парнокопытных потерь было еще больше: в Северной Америке в эпоху плейстоцена вымерло 13 родов, относящихся к пяти различным семействам, в том числе: два рода пекари, один род верблюдов, два рода лам, а также горный олень, лось, три рода вилорогих антилоп, сайгак, кустарниковый бык и мускусный бык.

Неудивительно, что такие потери среди травоядных повлекли за собой и вымирание хищников. Например, исчез американский гепард, саблезубая кошка, саблезубый тигр, гигантский короткомордый медведь, флоридский пещерный медведь, два рода скунсов и один род собак. Также в этот список можно включить животных меньшего размера, в том числе три рода грызунов и гигантского бобра, но они являлись исключениями — почти все вымершие животные были крупными.

Вымирание в Северной Америке совпало с кардинальной перестройкой в царстве растений. Большие территории Северного полушария изменили свой растительный облик: на место высокопитательных ив, осин и берез пришли не очень насыщающие еловые и ольховые рощи. В течение некоторого времени, даже там, где всегда господствовали ели (бедные питательными веществами деревья), все еще оставались места с более питательными

растениями. Когда количество питательных растений стало сокращаться из-за смены климата, травоядные животные все равно продолжали поедать именно их, тем самым еще больше уменьшая количество таких растений. Возможно, это и привело к уменьшению размеров животных, которые зависели от количества растительной пищи. В конце плейстоцена относительно проходимые еловые леса и сообщества более питательных растений быстро уступили место плотным лесам с меньшим разнообразием видов растений и меньшим питательным потенциалом. В восточных частях Северной Америки ели сменились большими, медленно растущими дубами, пеканами и южными соснами, а тихоокеанский северо-запад покрылся огромными лесами дугласовой пихты (псевдотсуга Мензиса — *Pseudotsuga menziesii*). Такие типы лесов, по сравнению с плейстоценовой растительностью, на смену которой они пришли, малопригодны для обитания крупных млекопитающих.

Вымирание коснулось не только Северной Америки^[253]. Северная и Южная Америки какое-то время находились в изоляции друг от друга, и поэтому их фауны развивались собственными особыми путями, пока около 2,5 млн лет назад не сформировался Панамский перешеек. В Южной Америке эволюционировали многие крупные и необычные животные, включая громадных глиптодонтов, похожих на броненосцев, и гигантских ленивцев, — обе группы позднее мигрировали в Северную Америку и распространились там. Также на южноамериканском континенте обитали гигантские свиньи, ламы, огромные грызуны и несколько сумчатых. Когда образовалась межконтинентальная сухопутная перемычка, начался активный взаимообмен между фаунами.

Южноамериканские крупные млекопитающие также подверглись вымиранию сразу после окончания ледникового периода. В интервале 15–10 тысяч лет назад исчезли 46 родов. В процентном соотношении вымирание в Южной Америке было даже более опустошительным, чем на североамериканском материке.

Еще больше пострадала Австралия, но несколько раньше, чем Америки. Со времен динозавров Австралия была изолирована океаном от прочих участков земной суши, поэтому она оказалась отрезанной от основных процессов развития млекопитающих, происходивших на прочих материках в кайнозойскую эру. Австралийские млекопитающие последовали своим эволюционным путем развития, в результате чего там появились многочисленные сумчатые, и многие — большого размера.

За последние 50 тысяч лет из австралийской фауны исчезло 45 видов сумчатых, относившихся к 13 родам. Из 49 видов крупных (тяжелее 10 кг) сумчатых, обитавших на австралийском континенте 100 тысяч лет назад, выжили всего четыре, а с других континентов другие животные в Австралию не проникали. Среди жертв вымирания — большие коалы, несколько видов дипротодонов (животных размером с гиппопотама), несколько больших кенгуру, гигантские вомбаты, а также группа сумчатых, имевших черты оленей. Хищники (также сумчатые) тоже подверглись вымиранию, например, существа, походившие на льва и собаку. На островах недалеко от австралийского побережья обнаружили ископаемых кошек, вымерших относительно недавно. Исчезли и крупные рептилии, например, гигантский варан, гигантская сухопутная черепаха, гигантская змея и даже несколько видов больших нелетающих птиц — все они были представителями так называемой австралийской мегафауны. Те из крупных существ, кто смог выжить, либо способны быстро бегать, либо ведут ночной образ жизни — такое интересное наблюдение сделал наш большой друг Тим Флэннери.

Все описанные случаи вымираний — в Австралии и обеих Америках — происходили одновременно с колонизацией этих территорий человеком, а также то были периоды значительных климатических изменений. Существуют достоверные данные, указывающие,

что первые люди прибыли в Австралию 50–35 тысяч лет назад. Большинство крупных австралийских животных вымерло к периоду около 30–20 тысяч лет назад.

Немного по-другому развивались события в тех регионах, где человек обжился значительно дольше, — в Африке, Азии и Европе. В Африке небольшое вымирание млекопитающих произошло 2,5 млн лет назад, а позже масштабы гибели животных, по сравнению с другими регионами, были весьма незначительны. Млекопитающие Северной Африки, в частности, подверглись воздействию климатических изменений, которые закончились образованием пустыни Сахары. В Восточной Африке вымирание было совсем небольшим, но вот в Южной Африке сильные перемены климата примерно 12–9 тысяч лет назад вызвали гибель шести видов крупных млекопитающих. В Европе и Азии последствия вымирания также были не столь серьезными, как в Австралии и Америке: погинули мамонты, мастодонты и шерстистые носороги.

Таким образом, плейстоценовое вымирание можно кратко охарактеризовать следующим образом:

- в первую очередь вымирание затронуло крупных сухопутных животных, меньшие формы и практически вся морская фауна вымиранию не подвергались;
- за последние 100 тысяч лет наибольшую выживаемость показали крупные млекопитающие Африки — всего 14 %, процентный показатель потерь среди родов млекопитающих в Северной Америке — 73 %, в Южной Америке — 79 %, в Австралии — 86 %;
- вымирания оказались внезапными для каждой большой группы сухопутных животных, но время вымираний на разных континентах различается; методы углеродного анализа позволяют более-менее точно определить, что, возможно, некоторые виды крупных млекопитающих полностью вымерли за периоды в 3 тысячи лет или даже быстрее;
- вымирания не были результатом вторжения в экосистемы новых форм животных (кроме человека); долгое время считалось, что многие вымирания были спровоцированы появлением новых, более развитых существ, однако это положение неверно для вымирания ледникового периода, поскольку в периоды гибели конкретных животных в регионах их обитания новые формы не появлялись. Многочисленные данные позволяют предположить, что причиной описываемого вымирания (серии вымираний на разных континентах) был человек. Другие исследователи упорно доказывают, что причиной стали изменения растительных пищевых ресурсов, возникшие в ответ на перемены климата в конце плейстоценового оледенения. В основном дискуссия в отношении данного вымирания вращается вокруг определения главной его причины: одни считают, что это был человек, другие — нестабильный климат.

Какова бы ни была причина, необходимо признать факт значительной реорганизации сухопутных экосистем, произошедшей в тот период на всех континентах, за исключением Африки. Сегодня Африка постепенно теряет своих гигантских млекопитающих — хотя их стада стараются сохранить в национальных парках и заповедниках, но именно там они становятся легкой добычей браконьеров.

Конец существования мегафауны до конца не определен. Когда мы смотрим на вымирание крупных млекопитающих плейстоцена, кажется, что это произошло всего мгновение назад. Точная датировка интервалов, которые длятся 10 тысяч лет, пока недоступна для наших технологий, если мы применяем их для периодов, происходивших тысячи и миллионы лет назад. С позиций сегодняшнего дня окончание периода мегафауны млекопитающих выглядит затянутым, но в будущем может показаться быстрым и внезапным.

Выжившие крупные млекопитающие сегодня являются группой видов, находящихся на

границы вымирания, а многие другие млекопитающие также входят в эту «группу риска». Если первая фаза современного массового вымирания обернулась гибелью крупных млекопитающих, то в текущий момент в непосредственной опасности находятся растения, птицы и насекомые, потому что древние леса Земли сменяются постепенно полями и городами.

Варианты познаваемого будущего.

Будущее недостижимо, за ним не угнаться, его не поймать. Чему нас точно научила история развития жизни, так это тому, что наравне с эволюцией другим участником игры на выживание всегда является случай. Случайность делает довольно ненадежными все прогнозы *будущего* хода игры. Замечательный ученый и блестящий писатель Дон Браунли из Вашингтонского университета все же попытался бросить вызов этой неопределенности будущего. Браунли считает, что существует так называемое познаваемое будущее, и что будущие события, как это ни парадоксально, тем более познаваемы, чем в более далеком будущем они могут произойти. По этому поводу Браунли выступал с сообщением о предсказуемых физических изменениях, которые ожидают нашу планету и Солнце. Один из примеров познаваемого будущего, которое можно довольно точно предсказать, — дальнейшая история развития нашего Солнца. Нам известно, что оно станет красным гигантом, его диаметр окажется больше земной орбиты и, вероятно, больше орбиты Марса, и, таким образом, Земля и Марс будут поглощены Солнцем через 7,5 млрд лет плюс-минус четверть миллиарда.

Изучение биологической эволюции на Земле углубляет знания ученых о событиях прошлого, способствуя таким образом пониманию возможного будущего. Например, мы знаем, что на эволюцию влияет не только взаимодействие форм жизни (конкуренция и хищничество), но в значительной степени также и события физической истории нашей планеты, ее атмосферы и океана. Хотя многие события по-прежнему будут диктоваться случаем, — скажем, интенсивностью взаимодействия Земли с космическими объектами, — тем не менее мы *действительно можем* довольно точно оценить вероятность изменения мировых температурных режимов, химии атмосферы и океана, крупномасштабные геологические события, которые непременно будут происходить в будущей истории Земли.

Понятие «обитаемая планета» предполагает, что формирование небесного тела имеет особенности, совокупность которых в конечном итоге приводит к появлению жизни. Мы уже рассматривали аспекты развития самых важных элементов и систем: энергетические (пищевые) компоненты, поддержание температурного режима, и изменения внутри этих систем или полное прекращение существования некоторых систем (например, расширение Солнца) вполне предсказуемы. Для развития жизни наиболее существенную роль играют циркуляция и трансформация таких элементов, как углерод, азот, сера, фосфор и разнообразные следовые элементы. Энергетические основы различных систем во многом определяются двумя источниками: Солнцем и теплом, которое образуется вследствие распада радиоактивных материалов в недрах Земли. Из этих двух источников энергии главным является Солнце, поскольку именно его воздействие обеспечивает процесс фотосинтеза.

Солнце — мощнейший ядерный реактор, но его стабильность сомнительна. По мере развития Солнца количество частиц в его ядре уменьшается, поскольку атомы водорода превращаются в атомы гелия. Парадоксальным при этом кажется то, что количество атомов в ядре Солнца уменьшается, но количество испускаемой им энергии (свет и тепло) медленно, но неуклонно увеличивается.

Все звезды типа Солнца обладают таким же признаком. Яркость Солнца за последние 4,5 млрд лет увеличилась на 30 %. Усиление яркости повышает и интенсивность освещения планет. Если процесс увеличения яркости Солнца продолжится, то исчезнут океаны, и на Земле воцарятся адские условия, сходные с теми, что сейчас существуют на Венере. Конечно,

океаны не «выкипят», как это представлено на некоторых страшных изображениях будущего, но постепенно молекулы воды потеряют водород, который поднимется высоко в атмосферу, кислород при этом останется внизу.

Земля на протяжении всего своего существования находится в «умеренном поясе» Солнечной системы, то есть на «правильном» расстоянии от Солнца, и поэтому температуры на поверхности планеты благоприятны для существования океанов и животных — они не замерзают и не сгорают. *Обитаемый пояс* распространяется от известного предела непосредственно внутри земной орбиты до своей не до конца изученной внешней границы возле Марса или, возможно, дальше него. Обитаемый пояс расширяется по мере усиления яркости Солнца, и в будущем Земля окажется вне его пределов. По сути, она превратится в современную Венеру. Внутренняя граница обитаемого пояса находится всего в 15 млн км от нас, быстро приближается и достигнет Земли через 0,5–1 млрд лет (возможно, и быстрее). После этого Солнце станет слишком ярким для существования жизни на нашей планете...

Постоянно увеличивающийся объем солнечной энергии, который поступает на Землю в течение последних 4,567 млрд лет, уже давным-давно должен был убить все живое на планете, как, например, это случилось на Венере (если предположить, что там когда-либо существовала жизнь). Исключением была бы одна, но очень важная система, поддерживающая жизнь на Земле, — планетарный «термостат», описанный в первой главе. Более трех (возможно, и четырех) миллиардов лет данная система поддерживала баланс средних мировых температур между температурами кипения и замерзания воды (за исключением периодов «Земли-снежка»). Благодаря этому на Земле в течение весьма длительного времени стало возможно существование важнейшего элемента, необходимого для жизни, — жидкой воды. Также важно то, что живым формам, появившимся внутри ограниченного температурного диапазона, удалось поддержать свои физиологические и химические процессы, протекание которых серьезно зависит от температурного режима. Повышение температуры на планете под воздействием возрастающей солнечной энергии и, в том числе, увеличение углекислого газа в атмосфере — вот два процесса, которые в совокупности самым значительным образом повлияют в будущем на эволюцию живых организмов.

Периоды увеличения и снижения концентрации углекислого газа в природе за последние 500 млн лет (время появления и развития животных) сегодня хорошо изучены и задокументированы, однако животным, конечно же, необходим кислород. Мы описали изменения в соотношении этих двух газов в прошлом, и будущее поведение углекислого газа и кислорода так же хорошо предсказуемо, как и интенсивность увеличения яркости Солнца.

Долговременный прогноз в отношении поведения углекислого газа заключается в том, что продолжится та же тенденция, которая наблюдается на протяжении последнего миллиарда лет, — концентрация данного газа будет уменьшаться. Сокращение количества данного газа происходит из-за процессов и в самой живой природе, и в тектонике плит: чем больше потребляется CO_2 для формирования скелетов живых существ, особенно в океане, тем меньше его в атмосфере. Если эти скелеты остаются в океане, заключенный в них углерод (теперь в форме карбоната кальция) вступает в процесс круговорота углерода. Однако тектоническое движение приводит к увеличению общей площади континентов, и известняк — могила атмосферного CO_2 — накапливается на суше как осадочная порода.

Можно подумать, что долговременное снижение уровня углекислого газа неизбежно приведет к образованию «Земли-снежка» Но не похолодание из-за недостатка атмосферного CO_2 ждет Землю в будущем. Будет жара. Повышение температуры как следствие воздействия

Солнца сведет на нет процессы, ведущие к похолоданию, — уменьшение концентрации углекислого газа в атмосфере и парниковый эффект. Когда средняя температура на земном шаре достигнет примерно 50–60 °С, океаны начнут улечиваться в космос.

Впрочем, на поверхности суши жизнь все равно исчезнет задолго до того, как исчезнут океаны — примерно через 2–3 млрд лет, потому что фотосинтезирующие организмы — от микроскопических форм до гигантских растений — не смогут выжить в условиях недостатка углекислоты. Убывание атмосферного CO₂, источника углерода, в дальнейшем приведет к сокращению пригодных к обитанию зон на самой планете, поскольку кислорода тоже станет меньше.

Эти процессы можно наблюдать уже сейчас. Когда сосудистые растения только появились на поверхности Земли около 475 млн лет назад, атмосфера была насыщена углекислым газом. Не было необходимости накапливать углерод в физиологических процессах. Сегодня многим видам растений требуется как минимум 150 ppm углекислого газа, а вот Джеймс Кастинг в своей статье (1997 год) отмечает, что существует довольно большая группа растений, включающая, например, многие распространенные травянистые растения средних широт, которые используют совершенно другой тип фотосинтеза и могут выживать при более низком содержании CO₂ в атмосфере, иногда даже при показателе 10 ppm, — это растения с фотосинтезом-C₄, описанные в одной из предыдущих глав нашей книги. Такие растения просуществуют намного дольше, чем их коллеги, зависимые от высоких концентраций углекислого газа, и, конечно, эти более выносливые растения значительно продлят жизнь биосферы, даже когда уровень углекислого газа упадет намного ниже современных показателей.

Мы с уверенностью можем предсказать, что эволюция растений пойдет по пути развития форм, приспособленных к условиям с низким уровнем углекислоты. Кроме того, из-за повышения мировых температур растениям станет сложнее удерживать воду. У растений есть две противоборствующие потребности: дать возможность углекислому газу проникнуть внутрь и обеспечить фотосинтез и в то же время избежать чрезмерного испарения воды, при этом оба процесса происходят по одному и тому же каналу — через отверстия во внешнем покрове, устьица. Скорее всего, флора будущего будет состоять из плотных восковистых растений, полностью закрывающих свои устьица в темное время, когда солнца недостаточно для фотосинтеза.

Листья, по крайней мере в их сегодняшней форме, вероятно, исчезнут, то же самое произойдет и с травой. Узколистные травы и тонкие листья иных растений будут обречены из-за огромной потери воды. Все эти изменения неизбежно повлияют и на жизнь животных.

Через 500 млн лет, хотя, может быть, и через 1 млрд лет, уровень углекислого газа в атмосфере достигнет показателей, при которых привычная для нас растительная жизнь станет невозможной. Поначалу все будет не так уж драматично. Растения начнут погибать постепенно, планета не станет бурой за один день. На смену вымершим группам растений быстро придут другие, которые не будут разительно отличаться от погибших предшественников. Тем не менее типы фотосинтеза старых и новых растений будут совершенно разными. После этой перестановки жизнь на планете продолжится, наверное, почти в том же виде, в каком она существовала до изменения господствующего типа фотосинтеза. Продолжится еще какое-то время...

Существует вероятность, что растения разовьют и другие, пока неизвестные типы фотосинтеза, чтобы компенсировать недостаток углекислоты. В таком случае некоторые группы растений смогут выживать при самых минимальных концентрациях углекислого газа

в окружающей среде. Однако рано или поздно погибнут даже самые стойкие. Все теоретические модели показывают, что количество CO_2 будет неуклонно сокращаться до критического показателя 10 ppm.

Одной из главных проблем развития жизни в будущем является биоразнообразие — количество видов организмов на Земле. Возникают два вопроса: во-первых, будет ли видов больше, чем сейчас, и во-вторых, если их будет больше, то как долго это продлится? Чтобы ответить на эти вопросы, снова следует обратиться к прошлому.

Дефицит углекислого газа окажется опасным не только для растений. Крупные морские растения и, возможно, планктон также сильно пострадают. В конце концов изменениям подвергнутся все морские сообщества, поскольку пищевая основа большинства морских экосистем — фитопланктон, одноклеточные растения, плавающие в толще воды. Уменьшение количества углекислого газа повлияет на фитопланктон самым непосредственным образом. Но и без этого исчезновение сухопутных растений нанесет сокрушительный удар по объему биомассы морского планктона.

Морской фитопланктон очень уязвим в отношении своих ресурсов питания. Когда в морскую воду поступают нитраты, железо и фосфаты, фитопланктон бурно расцветает. Однако источником этих нитратов и прочего являются гниющие сухопутные растения, которые приносят в океан реки. Если на суше количество растений сократится, то и нитраты иссякнут. Моря ждет голод, количество планктона катастрофически уменьшится, а последствия этой катастрофы уже никогда не будут устранены. Даже если сухопутные растения продолжают свое существование в том режиме, как описывалось чуть выше, невозможно будет наполнить океан тем огромным количеством питательных элементов, которое поступает в моря, например, в современном мире в отсутствие дефицита углекислого газа.

Основы пищевых цепей в том виде, в каком они существуют сегодня, исчезнут. Потеря растений приведет к упадку биологической продуктивности — мере общего количества живых организмов на планете. Жизнь тем не менее еще не погибнет окончательно — массы бактерий, например, синезеленые водоросли, продолжают существовать, поскольку эти одноклеточные способны жить при таких показателях углекислого газа, которые для прочих — многоклеточных растений — слишком малы для поддержания жизни. Кроме того, синезеленые водоросли не нуждаются в кислороде.

Гибель растений до неузнаваемости изменит сухопутные организмы и всю природу на поверхности планеты. Исчезнут корни, и поверхностные слои суши станут неустойчивыми, изменится характер рек. Большие извилистые реки, какими мы их знаем, начали формироваться со времен силура (около 400 млн лет назад), когда появились наземные растения, поскольку для образования берегов требовались корни, сдерживающие породу. Когда растений нет — из-за крутого склона, неблагоприятной почвы или других причин, — образуются реки совершенно иного рода: потоки со множеством рукавов, как это бывает в аллювиальных дельтах или на границах ледников — то есть в среде того типа, где существование растений с развитой корневой системой затруднено или вовсе невозможно. Такова была природа рек на поверхности планеты до распространения сухопутных растений, такой она станет и в случае, если растения исчезнут из-за нехватки углекислого газа.

Выветривание почв также может стать неизбежной и грустной потерей. С исчезновением почв обнажатся горные породы. Когда на поверхности планеты начнется этот процесс, изменится альbedo — отражательная способность земной поверхности, и больше света начнет отражаться обратно в космос, а это, в свою очередь, повлияет на температурный режим Земли. Атмосфера, теплообмен в ней и режим осадков полностью изменятся. Ветер

начнет переносить частицы песка, образованного совокупным воздействием жары, холода и воды на обнаженные горные породы. Механическое выветривание создаст огромные массы песка, несмотря на то что воздействие химического выветривания вследствие исчезновения почв снизится. Поверхность планеты покроется бесконечными барханами.

Хотя этот период и станет провозвестником окончательного вымирания растений на суше (а возможно, и в океане), но скорее всего растения продолжат свое существование еще долгое время, может, сотни миллионов лет — пока будет позволять количество углекислого газа в атмосфере. Гибель растений приостановит выветривание, а углекислый газ снова начнет накапливаться в атмосфере, позволяя некоторым сохранившимся семенам и корешкам прорасти и пожить, по меньшей мере, еще несколько тысячелетий, хотя численность растений будет гораздо меньше прежней. Как только растения снова распространятся на суше, усилится выветривание, а углекислый газ из атмосферы станет уходить интенсивнее.

Жизнь животных зависит от уровня кислорода в атмосфере. Практически не существует животных, которые могли бы существовать в условиях отсутствия кислорода или при наличии очень небольшого его количества в окружающей среде (в 2010 году в глубоководной области Средиземного моря были обнаружены беспозвоночные, способные жить без кислорода). Дэвид Катлинг из Вашингтонского университета предположил, что примерно через 15 млн лет после исчезновения растений в атмосфере останется всего 1 % кислорода.

Будущая эволюция человека

Жизнь служит и двигателем своего развития, и причиной собственной гибели. Питер Уорд, кроме того, что он является одним из авторов этой книги, также создал «теорию Медеи», основной тезис которой заключается в следующем: жизнь в большей степени враждебна сама себе, чем полезна; чем дольше существует какая-либо экосистема, тем меньше вероятность того, что виды, ее населяющие, станут еще более приспособленными к условиям существования в данной экосистеме. Как мы уже неоднократно показывали, реальным фактором самых масштабных массовых вымираний являлись прежде всего различные токсины, вырабатываемые микроорганизмами. Поэтому мы считаем вполне логичным закончить наше сочинение небольшим комментарием относительно вида, в наибольшей степени склонного к саморазрушению, — человека разумного. Какое будущее нас ожидает?

Научная фантастика изображает человека будущего существом с огромной головой, высоким лбом и очень большим, больше современного, мозгом, с еще более развитым интеллектом. Однако вряд ли мозг станет больше. Палеонтологическая летопись показывает, что времена быстрого увеличения мозга, если судить по размерам черепов за последние несколько тысяч поколений, давно прошли, и условия (как предполагается, климатические), способствовавшие увеличению размеров мозга, не повторятся. Если эволюция не коснется размеров мозга, то *что на самом деле может произойти?* Впрочем, существует не менее интригующий вопрос: насколько человеческий вид уже развился со времени своего появления 200 тысяч лет назад?

Результаты некоторых генетических исследований стали удивительным откровением — геном человека не только подвергся значительным перестановкам с момента появления вида (примерно 200 тысяч лет назад), но, кажется, эволюция человека становится все интенсивнее последние 30 тысяч лет. В работе Генри Харпендинга и Джона Хокса сделан вывод, что только за последние 5 тысяч лет люди развивались в 100 раз быстрее, чем в любое другое время с момента отделения (около 6 млн лет назад) гоминид от своих предков, от которых также произошли шимпанзе. Кроме того, среди человеческих рас не происходило стирания расовых признаков, наоборот, в недавнем прошлом отличительные характеристики рас стали еще более четкими. Лишь за последние 100 лет, благодаря развитию транспортной инфраструктуры, а также из-за большей открытости в поведении людей в целом процесс развития и закрепления расовых различий немного замедлился в основном по двум причинам: общность пищевых привычек и большие скопления людей в городах.

Таким образом, люди оказались самыми ретивыми «эволюционерами», по крайней мере, были таковыми до самого последнего момента. Зная об этой особенности нашего вида, мы можем предполагать, какой эволюционный путь нам предстоит, учитывая, что нашему виду на развитие отпущено несколько миллионов лет — таков средний срок существования всех видов млекопитающих. Большинство адаптивных процессов за последние 5 тысяч лет являлись реакцией на конкретные условия окружающей среды, а потому справедливо будет спросить себя, как природа будущего, с учетом увеличения городов и сельскохозяйственных угодий, повлияет на развитие человека — да и повлияет ли? Как же много вопросов о будущем можно задать! Люди станут больше или меньше? Поглупеют или поумнеют? Станут более интеллектуальными или более эмоциональными? Приспособится ли человек к новым трудностям окружающего мира, например, недостатку пресной воды или избытку ультрафиолета, повышению средней мировой температуры? Произойдет ли от человека

новый вид, или мы уже не способны порождать новые виды? Будет ли наша эволюция связана с генными процессами, или, может быть, мы каким-то образом напрямую подсоединим к нашему мозгу неорганические машины и тем самым разовьем небывалые способности к созданию и запоминанию информации? Является ли человечество всего лишь строительным материалом для следующего господствующего разумного вида на Земле — машин?

Пусть успокоятся те, кто предрекает скорый конец развитию жизни и скорое — или уже идущее! — очередное массовое вымирание. Наш мир за последние 3,4 млрд лет находится, пожалуй, на пике развития видовой численности. Мы считаем, что сейчас невозможно с точностью сказать, какое количество видов вскоре погибнет, поскольку неизвестен исходный фактор вымирания — мы не можем сказать, будет ли вымирание крупным (более 50 %), малым (10–50 %) или его не будет вовсе. Сегодня на Земле существует 1,6 млн видов. Если даже новое массовое вымирание неизбежно, можно утешиться тем, что после каждого вымирания биоразнообразие взлетает на новый небывалый уровень.

Существует знаменитое уравнение для определения количества других разумных видов в галактике — уравнение Дрейка. Так вот, сам Дрейк придерживается той точки зрения, что масштабное массовое вымирание, как, например, пермское, было бы благом для любой планеты. Вот только цена, которую придется за него заплатить. После пермского вымирания потребовалось 5–10 млн лет, чтобы биологическое разнообразие вернулось к показателям, предшествовавшим массовой гибели живых организмов. Мир после пермского вымирания, с позиций видového разнообразия и даже типов организмов, вернулся к состоянию протерозоя. Он вдруг стал похож на своего докембрийского предшественника — снова обрели господствующее положение микроорганизмы, приспособленные к бескислородным и токсичным условиям.

Еще одним, последним, предположением в рамках «теории Медеи» является то, что склонность к самоуничтожению свойственна жизни на любой обитаемой планете. Существует только один способ преодолеть эти суицидальные наклонности — разумность, способность предугадывать будущее. Например, можно предположить, что мы сможем колонизовать Марс, затем — пояс астероидов, а потом — и далекие звезды. Другой возможной картиной будущего может оказаться полное исчезновение ледяных шапок на полюсах вследствие того, что мы накачиваем нашу атмосферу углекислым газом — поднимется уровень Мирового океана, замедлится термохалинная циркуляция, возникнет застой и последующий дефицит кислорода — сначала у морского дна, а потом и на шельфах; все моря наполнятся сероводородом. В таком будущем выживут только те животные, на которых можно будет надеть противогаз.

История — это система раннего оповещения.

Всеми когда-нибудь приходит конец — и жизни планет, и жизни отдельных организмов, и актуальности научных теорий. Конечно, похороны — очень печальное событие, но оно также отмечает и определенный переходный момент: от жизни к смерти. Впрочем, еще печальнее период окончания жизни, например, когда человек узнает, что неизлечимо болен. Таков и пример наутилуса — существа, о котором мы рассказали на страницах нашей книги. Эти животные — модель вымерших аммонитов, они избежали массового вымирания, немного изменившись внешне, и сохранились как таксономическая группа. Наутилусы появились в период кембрийского взрыва 500 млн лет назад и сегодня по-прежнему живут с нами в разных частях Тихого океана, правда, не в очень большом числе, поскольку находятся на грани вымирания из-за своих раковин. Массовые вымирания не убивали животных из-за их красивой внешности, а вот люди убивают, в данном случае — ради раковин.

Наутилусы обречены не только из-за того, что стали объектом коммерции (в 2005–2010 годы в США завезли около полумиллиона раковин). Судьба их была решена задолго до масштабного истребления. Дело в том, что наутилусы сперва были приспособлены к обитанию в теплых неглубоких водах, так как их раковины требуют большого количества растворенного в воде кальция. Некоторое время эти существа были неуязвимы в своих красивых панцирях, но затем возникли животные, способные повредить раковину, и жизнь на мелководье стала невозможной.

Жизнь — это постоянное изменение. Наутилусы реагировали на возникновение новых экологических и эволюционных проблем приспособляемостью к обитанию в более глубоких местах. И вот итог последних 5 млн лет: они обитают на глубине 200–300 м, но строение их тела и раковины не успело приспособиться к такой глубине. Наутилусы стали медленнее расти: раньше, чтобы достичь взрослых размеров, им требовался год, теперь — 10–15 лет. Современные наутилусы — глубоководные животные, обитатели темных областей моря с бедными ресурсами. А ведь есть еще хищники, которые преследуют их даже на глубине. Но глубже наутилусам уже не спуститься, поскольку у их раковины есть глубинный предел, ниже которого они просто взорвутся. Спрятаться больше нигде.

Судьба наутилуса очень похожа на происходящее со всяким живым организмом. Рано или поздно эволюция, конкуренция, изменения в облике Земли и в природе Солнца сделают нежизнеспособным любой морфологический тип. Для сухопутных животных, например, наибольшую опасность представляют не хищники, а расширяющееся Солнце и уменьшение концентрации углекислого газа. На планете не останется места, где можно было бы спрятаться и выжить. Самое лучшее, что может сделать наш вид, так это уподобиться наутилусам, а еще лучше — синезеленым водорослям, использовавшим успешную стратегию выживания последние 2–3 млрд лет, — сбежать.

Эта глава — последняя в книге, посвященной истории развития жизни на Земле. Но можно создать и другую книгу, целую библиотеку книг!

Возможно, наша история жизни началась на Марсе. Выбор был простой — удрать и выжить, или погибнуть. Вот уж точно, способность выжить закреплена в наших генах.

J. Loewen, *Lies My Teacher Told Me: Everything Your American History Textbook Got Wrong* (New York: Touchstone Press, 2008).

J. Baldwin, *Notes of a Native Son* (Boston: Beacon Press, 1955).

N. Cousins, *Saturday Review*, 15 апреля, 1978.

P. Ward, «Impact from the Deep.» *Scientific American* (октябрь 2006). Сложно установить, кто первым употребил термин «парниковое массовое вымирание», однако Питер Уорд использовал его в статье, опубликованной в журнале *Discover* в 90-е годы.

Santayana, *The Life of Reason*, Five Volumes in One (1905).

Книга Форти была и остается шедевром, и не только из-за изложенных в ней фактов, но и за те рассказы о науке, которые кем-нибудь другим были бы расценены как скучные пережитки истории. На данный момент книга, однако, устарела (еще бы, учитывая огромное количество новых работ и самого Ричарда Форти). Мы использовали ее, так сказать, в качестве примера, за что, надеемся, нас простят. Нам нужно было от чего-то отталкиваться, за исключением, пожалуй, названия: когда-то казалось разумным предположение, что жизнь на Земле существует уже 4 миллиарда лет. Например, в середине 1990-х годов, когда книга была написана. Впрочем, это утверждение мы еще оспорим. Здесь представлена отсылка к книге: R. Fortey, *Life: A Natural History of the First Four Billion Years of Life on Earth* (New York: Random House, 1997).

Многое о взглядах тех, кто развивал геологию (в то время еще крайне молодое научное направление), а также ее подобласть — палеонтологию, можно прочитать в книге: M. J. Rudwick, *The Meaning of Fossils: Episodes in the History of Palaeontology* (London: Science History Publications, 1972). Эта книга, которую изначально было трудно достать, позднее была переиздана, став более доступной. Рассмотренный Радвиком временной промежуток конца XVIII — начала XIX столетия — время бурного обсуждения границ геологических эпох, процессов, время ранних размышлений об эволюции. Этот период развития геологии изложен им в книге, которая по сей день является очень важной и обязательной к прочтению всем тем, кто интересуется развитием естествознания.

Своим ученикам мы рассказываем о том, что Чарльз Дарвин прежде всего был геологом. Его умение разбираться в окаменелостях оказалось невероятно важным в процессе зарождения его знаменитой теории об эволюции видов. Однако и понимание им природы любых других ископаемых, которые он встречал каждый раз, сходя с крошечного «Бигля» (что происходило довольно часто в связи с тем, что Дарвин страдал от морской болезни), сыграло свою роль. Прочитать об этом можно в книге: A. Desmond, *Darwin* (New York: Warner Books, 1992).

M. Rudwick, *Georges Cuvier, Fossil Bones, and Geological Catastrophes: New Translations and Interpretations of the Primary Texts* (University of Chicago Press, 1997).

В 1998 г. геолог Дональд Кэнфилд из Университета Южной Дании предположил, что не кислород, а именно сера играла решающую роль в промежуточном океане. Его статья на эту тему была опубликована в журнале *Nature* 3 декабря 1998 г. С тех пор серонасыщенный мезопротерозойский океан многие ученые именуют не иначе как океан Кэнфилда. — *Примеч. ред.*

Существует множество работ на тему развития видового разнообразия за все время существования нашей планеты. Об этом мы поговорим чуть позже. Одной из последних работ является статья Джона Элроя в содружестве с его коллегами под названием «Phanerozoic Trends in Global Diversity of Marine Invertebrates,» (Science 321 (2008): 97).

Nick Lane, *The Vital Question: Why Is Life the Way It Is?* (London: Profile Books, 2015); Лестница жизни: десять величайших изобретений эволюции / Ник Лейн; пер. с англ. П. Петрова. — М.: АСТ: CORPUS, 2014. (Элементы); *Power. Sex, Suicide: Mitochondria and the Meaning of Life* (Oxford: Oxford University Press, 2005); Энергия, секс, самоубийство: митохондрии и смысл жизни. — СПб.: Питер, 2016. Oxygen: The Molecule That Made the World (Oxford: Oxford University Press, 2002).

Вопрос об использовании стратиграфии хорошо рассмотрен межнациональной подкомиссией по стратиграфии. Информацию можно найти онлайн. Одна из полезных глав представлена по следующему адресу — stratigraphy.org-upload-bak-defs.htm.

Используются разнообразные способы датировок; краткие сведения о применении урана, калиевого аргона, уранового свинца, изотопов стронция, а также магнитной стратиграфии можно найти в работах Мартина Радвика, которые доступны в Интернете. В частности: M. Rudwick, *Earth's Deep History: How It Was Discovered and Why It Matters* (Chicago: University of Chicago Press, 2014).

Первая система была построена на типах пород, включавших все виды: вулканические, метаморфические и в особенности осадочные породы (песчаник, мел, сланец). Подобный подход подразумевал, что каждый тип относится к определенной эпохе. Например, меловой период впервые получил свое название благодаря распространенности мела в Европе. Позднее выяснилось, что данный тип мог образоваться и в любой другой период. M. Rudwick, *The Meaning of Fossils: Episodes in the History of Paleontology* (London: Science History Publications, 1972).

Рассуждения об использовании осадочных пород для определения эпохи можно встретить во многих книгах. Равно как и соображения о вкладе Уильяма Смита в развитие геологии как способе определения геологических временных рамок. Одна из таких книг написана нашим старым другом Биллом Берри из Университета города Беркли в штате Калифорния — ученым, заслуги которого зачастую незаслуженно упускают из виду W. B. N. Berry, *Growth of a Prehistoric Time Scale* (Boston: Blackwell Scientific Publications, 1987): 202.

J. Burchfield, «Tire Age of the Earth and the Invention of Geological Time,» D. J. Blundell and A. C. Scott, eds., *Lyell: the Past is the Key to the Present* (London, Geological Society of London, 1998), 137–43.

К концу XIX века славы можно было добиться, просто занимаясь исследованием геологических периодов. Одним из таких счастливицов стал Лэпворт. Подробнее об этом можно прочитать в книге: M. Rudwick, *The Great Devonian Controversy: The Shaping of Scientific Knowledge Among Gentlemanly Specialists* (Chicago: University of Chicago Press, 1985).

K. A. Plumb, «New Precambrian Time Scale,» *Episode* 14, no. 2 (1991): 134–40.

A. H. Knoll, et al., «A New Period for the Geologic Time Scale,» *Science* 305, no. 5684 (2004): 621–22.

Понятие «землеподобная планета», или «планета земного типа», имеет такое же огромное множество трактовок, как и число таких планет, или, по крайней мере, наши предположения об их количестве. Толковое научное описание проблемы можно найти здесь: E. A. Petigura, A. W. Howard, G. W. Marcy, «Prevalence of Earth-Size Planets Orbiting Sun-Like Stars,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110, no. 48 (2013). doi:10.1073-pnas.1319909110, а также на сайте NASA [www. nasa.gov-mission_pages-kepler-news-kepler20130103.html](http://www.nasa.gov-mission_pages-kepler-news-kepler20130103.html).

В NASA организовали обсуждение взглядов на проблему (science1.nasa.gov-science-news-science-at-nasa-2003-020ct_goldilocks-are). Также к ознакомлению рекомендуется следующий источник: S. Dick, «Extraterrestrials and Objective Knowledge» в работе A. Tough, *When SETI Succeeds: The Impact of High-Information Contact* (Foundation for the Future, 2000): 47–48.

Хотя статья Джеффри Марси не относится к революционным, данная работа позволяет получить достаточное представление о теме: G. Marcy et al. «Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits and Metallicities,» *Progress of Theoretical Physics Supplement* no. 158 (2005): 24–42.

D. McKay et al., «Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in Martian Meteorite AL84001,» *Science* 273, no. 5277 (1996): 924-30.

P. Ward, *Life as We Do Not Know It: The NASA Search for and Synthesis of Alien Life* (New York: Viking, 2005); P. Ward and S. Benner, «Alternative Chemistry of Life,» in W. Sullivan and J. Baross, eds. *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology* (Cambridge: Cambridge University Press, 2008): 537-44.

W. K. Hartmann and D. R. Davis, «Satellite-Sized Planetesimals and Lunar Origin,» *Icarus* 24, no. 4 (1975): 504-14; R. Canup and E. Asphaug, «Origin of the Moon in a Giant Impact Near the End of the Earths Formation,» *Nature* 412, no. 6845 (2001): 708-12; A. N. Halliday, «Terrestrial Accretion Rates and the Origin of the Moon,» *Earth and Planetary Science Letters* 176, no. 1 (2000): 17–30; D. Stoffler and G. Ryder, «Stratigraphy and Isotope Ages of Lunar Geological Units: Chronological Standards for the Inner Solar System,» *Space Science Reviews* 96 (2001): 9–54.

A. T. Basilevsky and J. W. Head, «The Surface of Venus,» *Reports on Progress in Physics* 66, no. 10 (2003): 1699–1734; J. F. Kasting, «Runaway and Moist Greenhouse Atmospheres and the Evolution of Earth and Venus,» *Icarus* 74, no. 3 (1985): 472–94.

D. H. Grinspoon and M. A. Bullock, «Searching for Evidence of Past Oceans on Venus,» *Bulletin of the American Astronomical Society* 39 (2007): 540.

Общие сведения о возрасте Земли можно почерпнуть из источника: G. В. Dalrymple, *The Age of the Earth* (Redwood City': Stanford University Press, 1994). Более детально данный вопрос рассматривается им же в «The Age of the Earth in the Twentieth Century: A Problem (Mostly) Solved,» *Special Publications, Geological Society of London* 190 (2001): 205–21.

Удары космических тел о поверхность Земли могли сильно повлиять на раннюю историю планеты и развитие живых организмов — именно этой проблеме Кевин Мейер и Дэвид Стивенсон из Калифорнийского технологического института впервые адресовали короткое письмо в редакцию *Nature* в 1988 г. («Impact Frustration of the Origin of Life,» *Nature* 331, no. 6157 (1988): 612–14.) Многие поддержали данный вопрос, включая Кевина Занли и Норму Слипа: K. Zahnle et al., «Cratering Rates in the Outer Solar System,» *Icarus* 163 (2003): 263–89; F. Tera et al., «Isotopic Evidence for a Terminal Lunar Cataclysm,» *Earth and Planetary Science Letters* 22, no. 1 (1974): 1–21. Проблему источников подобных ударов в недавнем времени обсуждали вновь. При этом учитывалось и возможное смещение внешних планет через несколько миллионов лет после столкновений (время, датируемое прохождением Солнца его главной последовательности): W. F. Bottke et al., «An Archaean Heavy Bombardment from a Destabilized Extension of the Asteroid Belt,» *Nature* 485 (2012): 78–81; G. Ryder et al., «Heavy Bombardment on the Earth at -3.85 Ga: The Search for Petrographic and Geochemical Evidence,» in *Origin of the Earth and Moon*, R. M. Canup and K. L. Tigher, eds. (Tucson: University of Arizona Press, 2000): 475–92.

О происхождении земной атмосферы было написано много книг, www.amnh.org/learn-pd-earth-pdf-evolution-earth-atmosphere.pdf — хороший веб-сайт, посвященный роли живых организмов в этом процессе. Статья на тему: K. Zahnle et al., «Earths Earliest Atmospheres,» Cold Spring Harbor Perspectives in *Biology* 2, no. 10 (2010).

Наши студенты часто улыбались, когда мы заговаривали об испарении океанов из-за «астероидов размером с Техас». В те времена еще Джордж Буш-младший был президентом. С тех пор, однако, наша концепция приобрела немного другой, научный оттенок. Понятным языком об этом написано здесь: www.breadandbutter-science.com/CATIS.pdf.

Концентрация углекислого газа в составе ранней атмосферы Земли — вопрос довольно трудный. На данный момент не существует каких-то прямых методов определения этих концентраций. Источник: Walker, «Carbon Dioxide on the Early Earth,» *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 16, no. 2 (1985): 117–27. Что касается фанерозоя (время «видимой жизни»), на эту тему есть два основных труда: D. H. Rothman, «Atmospheric Carbon Dioxide Levels for the Last 500 Million Years,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, no. 7 (2001): 4167–71, и D. Royer et al., «CO₂ as a Primary Driver of Phanerozoic Climate,» *GSA Today* 14, no. 3 (2004): 4–15. Другие необъясненные понятия, упомянутые в главе, хорошо описаны в следующем источнике: L. Kump et al., *The Earth System*, 3rd ed. (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009). В этой потрясающей книге поясняется так называемая «наука о Земле». В ней отражены рассуждения об углеродных циклах, о которых мы упоминали, а также приведены обсуждения других процессов, ведущих к образованию жизни.

Питер Уорд посвятил этой теме отдельную книгу (P. Ward, *Out of Thin Air*. Washington, D.C.: Joseph Henry Press, 2006). Многое взято из следующей статьи: R. A. Berner, «Models for Carbon and Sulfur Cycles and Atmospheric Oxygen: Application to Paleozoic Geologic History,» *American Journal of Science* 287, no. 3 (1987): 177–90. Также для понимания вопроса важны следующие источники: L. R. Kump, «Terrestrial Feedback in Atmospheric Oxygen Regulation by Fire and Phosphorus,» *Nature* 335 (1988): 152–54; L. R. Kump, «Alternative Modeling Approaches to the Geochemical Cycles of Carbon, Sulfur, and Strontium Isotopes,» *American Journal of Science* 289 (1989): 390–410; L. R. Kump, «Chemical Stability of the Atmosphere and Ocean,» *Global and Planetary Change* 75, no. 1–2 (1989): 123–36; L. R. Kump and R. M. Garrels, «Modeling Atmospheric O₂ in the Global Sedimentary Redox Cycle,» *American Journal of Science* 286 (1986): 336–70.

W. F. Ruddiman and J. E. Kutzbach, «Plateau Uplift and Climate Change,» *Scientific American* 264, no. 3 (1991): 66–74, and M. Kuhle, «The Pleistocene Glaciation of Tibet and the Onset of Ice Ages — An Autocycle Hypothesis,» *Geojournal* 17 (4) (1998): 581–95; M. Kuhle, «Tibet and High Asia: Results of the Sino-German Joint Expeditions (I),» *Geojournal* 17, no. 4 (1988).

Биография и работы Роберта Бернера: R. A. Berner, «A New Look at the Long Term Carbon Cycle,» *GSA Today* 9, no. 11 (1999): 1–6; R. A. Berner, «Modeling Atmospheric Oxygen over Phanerozoic Time,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 65 (2001): 685–94; R. A. Berner, *The Phanerozoic Carbon Cycle* (Oxford: Oxford University Press, 2004), 150.; R. A. Berner, «The Carbon and Sulfur Cycles and Atmospheric Oxygen from Middle Permian to Middle Triassic,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69, no. 13 (2005): 3211–17; R. A. Berner, «GEOCARBSULF: A Combined Model for Phanerozoic Atmospheric Oxygen and Carbon Dioxide,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70 (2006): 5653–5664; R. A. Berner and Z. Kothavala, «GEOCARB III: A Revised Model of Atmospheric Carbon Dioxide over Phanerozoic Time,» *American Journal of Science* 301, no. 2 (2001): 182–204.

Пожалуй, лучший способ понять Марка Рота — это послушать его выступление по ссылке www.ted.com-talks-markrothsuspendedanimation.

T. Junod, «The Mad Scientist Bringing Back the Dead... Really,» Esquire.com, December 2, 2008.

В русских текстах используют слово «анабиоз». — *Примеч. пер.*

E. Blackstone et al., II S Induces a Suspended Animation-Like State in Mice, *Science* 308, no. 5721 (2005): 518.

D. Smith et al., «Intercontinental Dispersal of Bacteria and Archaea by Transpacific Winds,» *Applied and Environmental Microbiology* 79, no. 4 (2013): 1134–39.

K. Mailer and D. Stevenson, «Impact Frustration of the Origin of Life,» *Nature* 331 (1988): 612–14.

E. Schrodinger. *What Is Life?* (Cambridge: Cambridge University Press, 1944), 90.

P. Davies. *The Fifth Miracle: The Search for the Origin and Meaning of Life*. (New York: Penguin Press, 1995), 260.

P. Ward. *Life as We Do Not Know It* (New York: Viking Books, 2005).

W. Bains, «The Parts List of Life,» *Nature Biotechnology* 19 (2001): 401–2; W. Bains, «Many Chemistries Could Be Used to Build Living Systems,» *Astrobiology*, 4, no. 2 (2004): 137–67; and N. R. Pace, «The Universal Nature of Biochemistry,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98, no. 3 (2001): 805–808; S. A. Benner et al., «Setting the Stage: The History, Chemistry, and Geobiology Behind RNA,» *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 4, no. 1 (2012): 7–19; M. P. Robertson and G. F. Joyce, «The Origins of the RNA World,» *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 4, no. 5 (2012); C. Anastasi et al., «RNA: Prebiotic Product, or Biotic Invention?» *Chemistry and Biodiversity* 4, no. 4 (2007): 721–39; T. S. Young and P. G. Schultz, «Beyond the Canonical 20 Amino Acids: Expanding the Genetic Lexicon,» *The Journal of Biological Chemistry* 285, no. 15 (2010): 11 039-44.

F. Dyson. *Origins of Life*, 2nd ed. (Cambridge: Cambridge University Press, 1999), 100.

Ник Лэйн — человек точных суждений, который борется с предрассудками. Он хорошо описал сложный вопрос понимания энергии. N. Lane, «Bioenergetic Constraints on the Evolution of Complex Life,» in P. J. Keeling and E. V. Koonin, eds., *The Origin and Evolution of Eukaryotes*. Cold Spring Harbor Perspectives in Biology (2013).

J. Banavar and A. Maritan. «Life on Earth: The Role of Proteins,» J. Barrow and S. Conway Morris, *Fitness of the Cosmos for Life* (Cambridge: Cambridge University Press, 2007), 225–55.

E. Schneider and D. Sagan. *Into the Cool: Energy Flow, Thermodynamics, and Life* (Chicago, IL: University of Chicago Press, 2005).

Dr. D. R. Williams. Viking Mission to Mars, NASA. 18 декабря, 2006.

www.space.com-18803-viking.

ntrs.nasa.gov/archive/nasa-casi/ntrs.nasa.gov/19740026174.pdf. Также: R. Navarro-Gonzales et al., «Reanalysis of the Viking Results Suggests Perchlorate and Organics at Midlatitudes on Mars,» *Journal of Geophysical Research* 115 (2010).

P. Rincon, «Oldest Evidence of Photosynthesis,» BBC. com, December 17, 2003 and S. J. Mojzsis et al., «Evidence for Life on Earth Before 3,800 Million Years Ago,» *Nature* 384 (1996): 55–59; M. Schidlowski, «A 3,800-Million-Year-Old Record of Life from Carbon in Sedimentary Rocks,» *Nature* 333 (1988): 313–18; M. Schidlowski et al., «Carbon Isotope Geochemistry of the 3.7 x 10⁹-Yr-Old Isua Sediments, West Greenland: Implications for the Archaean Carbon and Oxygen Cycles,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 43 (1979): 189–99.

K. Maher and D. Stevenson. «Impact Frustration of the Origin of Life,» *Nature* 331 (1988): 612–14.

R. Dalton. «Fresh Study Questions Oldest Traces of Life in Akilia Rock,» *Nature* 429 (2004): 688. Данное исследование продолжается: Papineau et al., «Ancient Graphite in the Eoarchean Quartz-Pyroxene Rocks from Akilia in Southern West Greenland I: Petrographic and Spectroscopic Characterization,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 74, no. 20 (2010): 5862–83.

J. W. Schopf, «Microfossils of the Early Archean Apex Chert: New Evidence of the Antiquity of Life,» *Science* 260, no. 5108 (1993): 640–46.

M. D. Brasier et al., «Questioning the Evidence for Earths Oldest Fossils,» *Nature* 416 (2002): 76–81.

D. Wacey et al., «Microfossils of Sulphur-Metabolizing Cells in 3 4-Billion-Year-Old Rocks of Western Australia,» *Nature Geoscience* 4 (2011): 698–702.

M. D. Brasier, *Secret Chambers: The Inside Story of Cells and Complex Life* (New York: Oxford University Press, 2012), 298.

«Ancient Earth May Have Smelled Like Rotten Eggs,» *Talk of the Nation*, National Public Radio, 3 мая, 2013.

www.nasa.gov-mission_pages-msl-#.U4Izyxa9yxo.

www.abc.net.au/science/articles-2011-08-22-3299027.htm.

J. Haldane, *What Is Life?* (New York: Boni and Gaer, 1947), 53.

L. Orgel, *The Origins of Life: Molecules and Natural Selection* (Hoboken, NJ: John Wiley and Sons, 1973).

J. A. Baross and J. W. Deming, «Growth at High Temperatures: Isolation and Taxonomy, Physiology, and Ecology,» in *The Microbiology of Deep-sea Hydrothermal Vents*, D. M. Karl, ed., (Boca Raton: CRC Press, 1995), 169–217, и E. Stueken et al., «Did Life Originate in a Global Chemical Reactor?» *Geobiology* 11, no. 2 (2013); K. O. Stetter, «Extremophiles and Their Adaptation to Hot Environments,» *FEES Letters* 452, nos. 1–2 (1999): 22–25. K. O. Stetter, «Hyperthermophilic Microorganisms,» in *Astrobiology: The Quest for the Conditions of Life*, G. Homeckand, C. Baumstark-Khan, eds. (Berlin: Springer, 2002), 169–84.

Y. Shen and R. Buick, «The Antiquity of Microbial Sulfate Reduction.» *Earth Science Reviews* 64 (2004): 243–272.

S. A. Benner, «Understanding Nucleic Acids Using Synthetic Chemistry,» *Accounts of Chemical Research* 37, no. 10 (2004): 784–97; S. A. Benner, «Phosphates, DNA, and the Search for Nonterrestrial life: A Second Generation Model for Genetic Molecules,» *Bioorganic Chemistry* 30, no. 1 (2002): 62–80.

G. Wächtershauser, «Origin of Life: Life as We Don't Know It,» *Science*, 289, no. 5483 (2000): 1307–08; G. Wächtershauser, «Evolution of the First Metabolic Cycles,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 87, no. 1 (1990): 200–204; El. Wächtershauser, «On the Chemistry and Evolution of the Pioneer Organism,» *Chemistry 6-Biodiversity* 4, no. 4 (2007): 584–602.

N. Lane, *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution* (New York: W. W. Norton & Company, 2009).

W. Martin and M. J. Russell, «On the Origin of Biochemistry at an Alkaline Hydrothermal Vent,» *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 362, no. 1486 (2007); 1887–925.

C. R. Woese, «Bacterial Evolution,» *Microbiological Reviews* 51, no. 2 (1987); 221–71;
C. R. Woese, «Interpreting the Universal Phylogenetic Tree,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000); 8392–96.

S. A. Benner and D. Hutter, «Phosphates, DNA, and the Search for Nonterrean Life: A Second Generation Model for Genetic Molecules,» *Bioorganic Chemistry* 30 (2002): 62–80; S. Benner et al., «Is There a Common Chemical Model for Life in the Universe?» *Current Opinion in Chemical Biology* 8, no. 6 (2004): 672–89.

A. Lazcano, «What Is Life? A Brief Historical Overview,» *Chemistry and Biodiversity* 5, no. 4 (2007); 1–15.

B. P. Weiss et al., «A Low Temperature Transfer of ALH84 001 from Mars to Earth,» *Science* 290, no. 5492, (2000): 791–95. J. L. Kirschvink and B. P. Weiss, «Mars, Panspermia, and the Origin of Life: Where Did It All Begin?» *Palaeontologia Electronica* 4, no. 2 (2001): 8–15. J. L. Kirschvink et al., «Boron, Ribose, and a Martian Origin for Terrestrial Life,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70, no. 18 (2006): A320.

C. McKay, «An Origin of Life on Mars,» *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 2, no. 4 (2010). J. Kirschvink et al., «Mars, Panspermia, and die Origin of Life: Where Did It All Begin?» *Palaeontologia Electronica* 4, no. 2 (2002): 8–15.

D. Deamer, *First Life: Discovering the Connections Between Stars, Cells, and How Life Began* (Oakland: University of California Press, 2012), 286. Также новая статья нашего друга Ника Лэйна: N. Lane and W. F. Martin, «The Origin of Membrane Bioenergetics,» *Cell* 151, no. 7 (2012): 1406–16.

www.nobelprize.org-mediaplayer-index.php?id=1218

J. Raymond and D. Segre, «The Effect of Oxygen on Biochemical Networks and the Evolution of Complex Life,» *Science* 311 (2006): 1764–67.

J. F. Kasting and S. Ono, «Palaeoclimates: The first Two Billion Years,» *Philosophical Transactions of the Royal Society Biological Sciences* 361 (2006): 917–29.

P. Cloud, «Paleoecological Significance of Banded-Iron Formation,» *Economic Geology* 68 (1973): 1135–43.

R. E. Kopp and J. L. Kirschvink, «The Identification and Biogeochemical Interpretation of Fossil Magnetotactic Bacteria,» *Earth-Science Reviews* 86 (2008): 42–61.

J. L. Kirschvink et al., «Paleoproterozoic Snowball Earth: Extreme Climatic and Geochemical Global Change and Its Biological Consequences,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 97 (2000): 1400–1405.

J. L. Kirschvink and R. E. Kopp, «Paleoproterozoic Ice Houses and the Evolution of Oxygen-Mediating Enzymes: The Case for a Late Origin of Photosystem-II,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 363, no. 1504 (2008): 2755–65.

H. D. Holland, «Early Proterozoic Atmospheric Change,» in S. Bengtson, ed., *Early Life on Earth* (New York Columbia University Press, 1994), 237–44.

D. T. Johnston et al., «Anoxygenic Photosynthesis Modulated Proterozoic Oxygen and Sustained Earth's Middle Age,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106, no. 40 (2009), 16 925-29.

A. El Albani et al., «Large Colonial Organisms with Coordinated Growth in Oxygenated Environments 2.1 Gyr Ago,» *Nature* 466, no. 7302 (2002): 100–104.2; [www.sciencedaily.com-releases-2010-06-100630171711.htm](http://www.sciencedaily.com/releases/2010-06-100630171711.htm).

D. E. Canfield et al., «Oxygen Dynamics in the Aftermath of the Great Oxidation of Earth's Atmosphere,» *Proceedings of the National Academy of Sciences*, no. 422 (2013).

A. H. Knoll, *Life on a Young Planet: The First Three Billion Years of Evolution on Earth* (Princeton: Princeton University Press, 2003).

P. F. Hoffman et al., «A Neoproterozoic Snowball Earth,» *Science* 281, no. 5381 (1998): 1342–46;
F. A. Macdonald et al., «Calibrating the Cryogenian,» *Science*, 327, no. 5970 (2010): 1241–43.

B. Shen et al., «The Avalon Explosion: Evolution of Ediacara Morphospace,» *Science* 319 no. 5859 (2008): 81–84; G. M. Narbonne, «The Ediacara Biota: A Terminal Neoproterozoic Experiment in the Evolution of Life,» *Geological Society of America* 8, no. 2 (1998): 1–6; S. Xiao and M. Laflamme, «On the Eve of Animal Radiation: Phylogeny, Ecology and Evolution of the Ediacara Biota,» *Trends in Ecology and Evolution* 24, no. 1 (2009): 31–40.

От другого названия этого периода — вендский. — *Примеч. пер.*

R. C. Sprigg, «Early Cambrian „jellyfishes“ of Ediacara, South Australia and Mount John, Kimberly District, Western Australia,» *Transactions of the Royal Society of South Australia* 73 (1947): 72–99.

R. Sprigg, «On the 1946 Discovery of the Precambrian Ediacaran Fossil Fauna in South Australia,» *Earth Sciences History* 7 (1988): 46–51.

S. Turner and P. Vickers-Rich, «Sprigg, Martin F. Glaessner, Maiy Wade and the Ediacaran Fauna,» Отрывок для IGCP, Prato Workshop, Monash University Centre, 30–31 августа, 2004.

M. F. Glaessner, «Precambrian Animals,» *Scientific American* 204, no. 3 (1961): 72–78.

Южно-Австралийский музей; ископаемые эдиакарского периода,
www.samuseumn.sa.gov.au/explore/museum-galleries/ediacaran-fossils.

B. Waggoner, «Interpreting the Earliest Metazoan Fossils: What Can We Learn?» *Integrative and Comparative Biology* 38, no. 6 (1998): 975–82; D. E. Canfield et al., «Late-Neoproterozoic Deep-Ocean Oxygenation and the Rise of Animal Life,» *Science* 315, no. 5808 (2007): 92–95; B. Shen et al., «The Avalon Explosion: Evolution of Ediacara Morphospace,» *Science* 319, no. 5859 (2008): 81–84.

B. MacGabhann, «There is No Such Thing as the „Ediacaran Biota“,» *Geoscience Frontiers* 5, no. 1 (2014): 53–62.

N. J. Butterfield, «Bangiomorpha pubescens n. gen., 11. sp.: Implications for the Evolution of Sex, Multicellularity, and the Mesoproterozoic-Neoproterozoic Radiation of Eukaryotes,» *Paleobiology* 26, no. 3 (2000): 386–404.

M. Brasier et al., «Ediacaran Sponge Spicule Clusters from Mongolia and the Origins of the Cambrian Fauna,» *Geology* 25 (1997): 303–06.

J. Y. Chen et al., «Small Bilaterian Fossils from 40 to 55 Million Years before the Cambrian,» *Science* 305, no. 5681 (2004): 218–22; A. F. Knoll et al., «Eukaryotic Organisms in Proterozoic Oceans,» *Philosophical Transactions of the Royal Society* 361, no. 1470 (2006): 1023–38; B. Waggoner, «Interpreting the Earliest Metazoan Fossils: What Can We Learn?» *Integrative and Comparative Biology* 38, no. 6 (1998): 975–82.

A. Seilacher and F. Pfluger, «From Biomats to Benthic Agriculture: A Biohistoric Revolution,» in W. E. Krummbein et al., eds., *Biostabilization of Sediments*. (Bibliotheks und Informationssystem der Carl von Ossietzky Universität Odenburg, 1994), 97–105; A. Ivantsov, «Feeding Traces of the Ediacaran Animals,» *Abstract, 33rd International Geological Congress August 6–14, 2008, Oslo, Norway*; S. Dombos et al., «Evidence for Seafloor Microbial Mats and Associated Metazoan Lifestyles in Lower Cambrian Phosphorites of Southwest China,» *Lethaia* 37, no. 2 (2004): 127–37.

A. C. Maloof et al., «Combined Paleomagnetic, Isotopic, and Stratigraphic Evidence for True Polar Wander from the Neoproterozoic Akademikerbreen Group, Svalbard, Norway,» *Geological Society of America Bulletin*, 118, nos. 9–10 (2006): 1099–124; N. L. Swanson-Hysell et al., «Constraints on Neoproterozoic Paleogeography and Paleozoic Orogenesis from Paleomagnetic Records of the Bitter Springs Formation, Amadeus Basin, Central Australia,» *American Journal of Science* 312, no. 8 (2012): 817–84.

Дарвин Ч. Происхождение видов путем естественного отбора: В 2 кн. / Пер. с англ. К. Тимирязева; под общ. ред. Н. Вавилова — М.: ТЕРРА-Книжный клуб, 2009. В Вашингтонском университете мы требовали от студентов прочитать эту книгу, если те записывались на курс Новой истории происхождения жизни.

Хорошим путеводителем по формации сланцев Бёрджесс, а также для ознакомления с кембрийским периодом и учением Дарвина послужит одна незаменимая книга: S. J. Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History* (New York: W. W. Norton & Company, 1989). Стив Гулд, наш общий друг, был самым прекрасным лектором, которого нам доводилось встречать. Нужно было слышать его голос, его искусство оратора происходило от потрясающего ума и знаний в области эволюции Дарвина. Мы сильно скучаем по его мудрому, красноречивому и выдающемуся голосу. Если Томас Гексли был «бульдогом Дарвина», то Гулд, несомненно, его питбуль.

K. J. McNamara, «Dating the Origin of Animals,» *Science* 274, no. 5295 (1996): 1993–97.

A. H. Knoll and S. B. Carroll, «Early Animal Evolution: Emerging Views from Comparative Biology and Geology,» *Science* 254, no. 5423 (1999): 2129–371.

K. J. Peterson and N. J. Butterfield, «Origin of the Eumetazoa: Testing Ecological Predictions of Molecular Clocks Against the Proterozoic Fossil Record,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102, no. 27 (2005): 9547–52.

M. A. Fedonkin et al., *The Rise of Animals: Evolution and Diversification of the Kingdom Animalia* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2007), 213–16.

Сложно поспорить с тем, что кембрийский взрыв это одно из самых исключительных событий, описываемых палеонтологией. Однако те, кто изучает развитие жизни, считают появление животных событием малой важности: самое сложное заключалось в возникновении жизни, а животные лишь стали закономерным результатом. Мы придерживаемся другой точки зрения. Есть множество хороших работ по этой неоднозначной проблеме, например, G. E Budd and J. Jensen, «A Critical Reappraisal of the Fossil Record of the Bilaterian Phyla,» *Biological Reviews* 75, no. 2 (2000): 253–95; и S. J. Gould, *Wonderful Life*.

Уровень кислорода в кембрийский период вызывает споры. В этом вопросе мы доверяем Бобу Бернеру и его моделям «GEOCARBSULF». R. A. Berner, «GEOCARBSULF: A Combined Model for Phanerozoic Atmospheric Oxygen and Carbon Dioxide,» *Geochimica et Cosmochimica Acta* 70 (2006): 5653–64.

N. J. Butterfield, «Exceptional Fossil Preservation and the Cambrian Explosion,» *Integrative and Comparative Biology* 43, no. 1 (2003): 166–77; S. C. Morris, «The Burgess Shale (Middle Cambrian) Fauna,» *Annual Review of Ecology and Systematics* 10, no. 1 (1979): 327–49.

D. Briggs et al., *The Fossils of the Burgess Shale* (Washington, D.C.: Smithsonian Institution Press, 1994).

H. B. Whittington, Geological Survey of Canada, *The Burgess Shale* (New Haven: Yale University Press, 1985), 306–308.

J. W. Valentine, *On the Origin of Phyla* (Chicago: University of Chicago Press, 2004). Также J. W. Valentine and D. Envin, *The Cambrian Explosion: The Construction of Animal Biodiversity* (Roberts and Co. Publishing, 2013). 413; J. W. Valentine, «Why No New Phyla after the Cambrian? Genome and Ecospace Hypotheses Revisited,» abstract, *Palaios* 10, no. 2 (1995): 190–91. Также S. Bengtson, «Origins and Early Evolution of Predation», M. Kowalewski and P. H. Kelley, The Fossil Record of Predation. *The Paleontological Society Papers* 8 (Paleontological Society, 2002): 289–317.

P. Ward, *Out of Thin Air* (Joseph Henry Press, 2006).

Название является фразой из работы Ч. Дарвина «Происхождение видов». — *Примеч. пер.*

H. X. Guang et al., *The Cambrian Fossils of Chengjiang, China: The Flowering of Early Animal Life*. (Oxford: Blackwell Publishing, 2004).

Этот спор между двумя образованными людьми закончился бы дуэлью и смертью одного из них, будь это в XIX веке. Гулд ценил труд Морриса и был с ним вежлив, в то время как последний вовсе не сдерживался. Хорошее описание ситуации можно найти здесь: www.stephenjaygould.org-library-naturalhistory_cambrian.html.

M. Brasier et al., «Decision on the Precambrian-Cambrian Boundary Stratotype,» *Episodes* 17, no. 1–2 (1994): 95–100.

W. Compston et al., «Zircon U-Pb Ages for the Early Cambrian Time Scale,» *Journal of the Geological Society of London* 149 (1992): 171–84.

A. C. Maloof et al., «Constraints on Early Cambrian Carbon Cycling from the Duration of the Nemakit-Daldynian-Tommotian Boundary Delta C-13 Shift, Morocco,» *Geology* 38, no. 7 (2010): 623–26.

M. Magaritz et al., «Carbon-Isotope Events Across the Precambrian-Cambrian Boundary on the Siberian Platform,» *Nature* 320 (1986): 258–59.

Здесь авторы ссылаются на известный фрагмент из трилогии Дж. Р. Р. Толкина «Властелин колец», в котором надпись на волшебном кольце гласит: «Одно кольцо покорит их, одно соберет их, одно их притянет и в черную цепь скует их» (пер. В. Муравьева и А. Кистяковского). — *Примеч. пер.*

Steptoean Positive Carbon Isotope Excursion (SPICE) — кембрийский положительный сдвиг изотопа углерода. — *Примеч. пер.*

Лучший источник информации для первичного ознакомления с древними коралловыми рифами — это книга нашего друга Джорджа Стенли из Университета Монтаны: G. Stanley, *The History and Sedimentology of Ancient Reef Systems* (Springer Publishing, 2001). Также W. Kiessling, E. Flugel, and J. Golonka, eds., *Phanerozoic Reef Patterns* 72 (SEPM Special Publications, 2002), 391–463.

Окаменелости археоциат крайне интересны. В XX веке считалось, что не было ни одного типа организмов, к которым их можно было бы причислить. Сейчас их причисляют к губкам. Однако они обладают интересной структурой «конус-в-конусе» (как если бы один пустой вафельный рожок был помещен в другой). Они являются первыми рифообразующими организмами, о которых мы знаем, им принадлежат трехмерные «постройки», созданные живыми организмами и устойчивые к воздействию волн. Таково наше определение рифа. F. Debrenne and J. Vacelet, «Archaeocyatha: Is the Sponge Model Consistent with Their Structural Organization?» *Palaeontographica Americana* 54 (1984): 358–69.

T. Servais et al., «The Ordovician Biodiversification: Revolution in the Oceanic Trophic Chain,»
Lethaia 41,110.2 (2008): 99.

P. Ward, *Out of Thin Air: Dinosaurs, Birds, and Earths Ancient Atmosphere* (Washington, D. C.: Joseph Henry Press, 2006).

P. Ward, *Out of Thin Air*. Также обратите внимание на выводы, сделанные нашим коллегой и соавтором по теме вымирания в статье: C. R. Marshall, «Explaining the Cambrian „Explosion“ of Animals,» *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 34 (2006): 355–84.

J. Valentine, «How Many Marine Invertebrate Fossils?» *Journal of Paleontology* 44 (1970): 410–15; N. Newell, «Adequacy of die Fossil Record,» *Journal of Paleontology* 33 (1959): 488–99.

- D. M. Raup, «Taxonomic Diversity During the Phanerozoic,» *Science* 177 (1972): 1065–71;
- D. Raup, «Species Diversity in the Phanerozoic: An Interpretation,» *Paleobiology* 2 (1976): 289–97.

J. J. Sepkoski, Jr., «Ten Years in the Library: New Data Confirm Paleontological Patterns,» *Paleobiology* 19 (1993): 246–57; J. J. Sepkoski, Jr., «A Compendium of Fossil Marine Animal Genera,» *Bulletins of American Paleontology* 363: 1–560.

J. Alroy et al., «Effects of Sampling Standardization on Estimates of Phanerozoic Marine Diversification,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 98 (2001): 6261–66.

J. Sepkoski, «Alpha, Beta, or Gamma; Where Does All the Diversity Go?» *Paleobiology* 14 (1988): 221–34.

J. Alroy et al., «Phanerozoic Diversity Trends,» *Science* 321 (2008); 97.

A. B. Smith, «Large-Scale Heterogeneity of the Fossil Record: Implications for Phanerozoic Biodiversity Studies,» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 356, no. 1407 (2001): 351–67; A. B. Smith, «Phanerozoic Marine Diversity: Problems and Prospects,» *Journal of the Geological Society*, London 164 (2007): 731–45; A. B. Smith and A. J. McGowan, «Cyclicality in the Fossil Record Mirrors Rock Outcrop Area,» *Biology Letters* 1, no. 4 (2005): 443–45; A. B. Smith, «The Shape of the Marine Paleodiversity Curve Using the Phanerozoic Sedimentary Rock Record of Western Europe,» *Paleontology* 50 (2007): 765–74; A. McGowan and A. Smith «Are Global Phanerozoic Marine Diversity Curves Truly Global? A Study of the Relationship between Regional Rock Records and Global Phanerozoic Marine Diversity,» *Paleobiology*, 34, no. 1 (2008): 80–103.

M. J. Benton and B. C. Emerson, «How Did Life Become So Diverse? The Dynamics of Diversification According to the Fossil Record and Molecular Phylogenetics,» *Paleontology* 50 (2007): 23–40.

S. E. Peters, «Geological Constraints on the Macroevolutionary History of Marine Animals,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 102 (2005): 12 326-31.

Это один из наших любимых моментов в палеонтологии, к которому можно применить фразу «А король-то голый». Команда исследователей из Института Канзаса выдвинула гипотезу, что события в ордовике могли быть вызваны гамма-излучением из глубокого космоса. Подобные случаи действительно существуют, огромное количество энергии рождается из малых звезд, полных энергии, подобно пульсарам и магнитарам из далеких от нас областей галактики. Но довольно странным кажется предположение, что подобная энергетическая вспышка (гамма-всплеск) могла «поджечь» Землю, вызвав при этом ордовикское массовое вымирание. С таким же успехом виновниками данного события можно считать вулканы или, скажем, разозленного Дарта Вейдера (впрочем, было ли у бедняги Вейдера хоть какое-то другое настроение?). A. L. Melott and B. C. Thomas, «Late Ordovician Geographic Patterns of Extinction Compared with Simulations of Astrophysical Ionizing Radiation Damage,» *Paleobiology* 35 (2009): 311–20. См. также www.nasa.gov/vision-universe-starsgalaxies-gammaray_extinction.html.

R. K. Bambach et al., «Origination, Extinction, and Mass Depletions of Marine Diversity,» *Paleobiology* 30, no. 4 (2004): 522–42.

S. A. Young et al., «A Major Drop in Seawater ^{87}Sr - ^{86}Sr during the Middle Ordovician (Daniwilian): Links to Volcanism and Climate?» *Geology* 37, 10 (2009): 951–54.

S. Finnegan et al., «The Magnitude and Duration of Late Ordovician-Early Silurian Glaciation,» *Science* 331, no, 6019 (2011): 903–906.

S. Finnegan et al., «Climate Change and the Selective Signature of the Late Ordovician Mass Extinction,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, no. 18 (2012): 6829–34.

Кратко о ранних четвероногих организмах, а также о процессе их эволюции можно прочитать на сайте: www.devoniantimes.org-opportunity-tetrapodsAnswer.html, или обратиться к следующему источнику: S. E. Pierce et al., «Three-Dimensional Limb Joint Mobility in the Early Tetrapod» *Ichthyostega Nature* 486 (2012): 524–27, and P. E. Ahlberg et al., «The Axial Skeleton of the Devonian Tetrapod» *Ichthyostega Nature* 437, no. 1 (2005): 137–40.

J. A. Clack, *Gaining Ground: The Origin and Early Evolution of Tetrapods*, 2nd ed. (Bloomington: Indiana University Press, 2012).

E. B. Daeschler et al., «A Devonian Tetrapod-Like Fish and the Evolution of the Tetrapod Body Plan,» *Nature* 440, no. 7085 (2006): 757–63; J. P. Downs et al., «The Cranial Endoskeleton of *Tiktaalik roseae*,» *Nature* 455 (2008): 925–29. Выводы: P. E. Ahlberg and J. A. Clack, «A Firm Step from Water to Land,» *Nature* 440 (2006): 747–49.

N. Shubin, *Your Inner Fish: A Journey into the 3.5-Billion-Year History of the Human Body* (Chicago: University of Chicago Press, 2008); B. Holmes, «Meet Your Ancestor, the Fish That Crawled,» *New Scientist*, September 9, 2006.

A. K. Behrensmeyer et al., eds., *Terrestrial Ecosystems Through Time: Evolutionary Paleoecology of Terrestrial Plants and Animals* (Chicago and London: University of Chicago Press, 1992); P. Kenrick and P. R. Crane, *The Origin and Early Diversification of Land Plants. A Cladistic Study* (Washington: Smithsonian Institution Press, 1997).

S. B. Hedges, «Molecular Evidence for Early Colonization of Land by Fungi and Plants,» *Science* 293 (2001): 1129–33.

C. V. Rubenstein et al., «Early Middle Ordovician Evidence for Land Plants in Argentina (Eastern Gondwana),» *New Phytologist* 188, no. 2 (2010): 365–69. С докладом на данную тему можно ознакомиться здесь: [www.dailymail.co.uk/sciencetech-article-1319904-Fossils-worlds-oldest-plants-unearthed-Argentina.html](http://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-1319904-Fossils-worlds-oldest-plants-unearthed-Argentina.html).

J. T. Clarke et al., «Establishing a Time-Scale for Plant Evolution,» *New Phytologist* 192, no. 1 (2011): 266–30; M. E. Kotyk et al., «Morphologically Complex Plant Macrofossils from the Late Silurian of Arctic Canada,» *American Journal of Botany* 89 (2002): 1004–13.

Наша работа о распространении насекомых и позвоночных упоминается в следующем источнике: P. Ward et al., «Confirmation of Romer's Gap as a Low Oxygen Interval Constraining the Timing of Initial Arthropod and Vertebrate Terrestrialization,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 10, no. 45 (2006): 16 818-22.

R. Dudley, «Atmospheric Oxygen, Giant Paleozoic Insects and the Evolution of Aerial Locomotor Performance,» *The Journal of Experimental Biology* 201 (1988): 1043–50; R. Dudley, *The Biomechanics of Insect Flight: Form, Function, Evolution* (Princeton: Princeton University Press, 2000); R. Dudley and P. Chai, «Animal Flight Mechanics in Physically Variable Gas Mixtures,» *The Journal of Experimental Biology* 199 (1996): 1881–85. Также C. Gans et al., «Late Paleozoic Atmospheres and Biotic Evolution,» *Historical Biology* 13 (1991): 199–219; J. Graham et al., «Implications of the Late Paleozoic Oxygen Pulse for Physiology and Evolution,» *Nature* 375 (1995): 117–20; J. F. Harrison et al., «Atmospheric-Oxygen Level and the Evolution of Insect Body Size,» *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 277 (2010): 1937–46.

D. Flouday et al., «The Paleozoic Origin of Enzymatic Lignin Decomposition Reconstructed from 31 Fungal Genomes,» *Science* 336, no. 6089 (2012): 1715-19.

Там же.

J. A. Raven, «Plant Responses to High O₂ Concentrations: Relevance to Previous High O₂ Episodes,» *Global and Planetary Change* 97 (1991): 19–38; and J. A. Raven et al., «The Influence of Natural and Experimental High O₂ Concentrations on O₂-EvoKing Phototrophs,» *Biological Reviews* 69 (1994): 61–94 2.

J. S. Clark et al., *Sediment Records of Biomass Burning and Global Change* (Berlin: Springer-Verlag, 1997); M. J. Cope et al., «Fossil Charcoals as Evidence of Past Atmospheric Composition,» *Nature* 283 (1980): 647–49; C. M. Belcher et al., «Baseline Intrinsic Flammability of Earth's Ecosystems Estimated from Paleoatmospheric Oxygen over the Past 350 Million Years,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, no. 52 (2010): 22 448-53. Мы считаем, что главный недостаток этих экспериментов в том, что их результаты не подтвердятся при высоких температурах горения. Даже при малом количестве кислорода обычный удар молнии образует гораздо большую температуру, чем та, которую использовали в данном исследовании.

D. Beerling, *The Emerald Planet: How Plants Changed Earth's History* (New York: Oxford University Press, 2007).

Q. Cai et al., «The Genome Sequence of the Ground Tit *Pseudopodoces kumilis* Provides Insights into Its Adaptation to High Altitude,» *Genome Biology* 14, no. 3 (2013); www.geo.umass.edu/climate-quelccaya-diuca.html, а также P. Ward, *Out of Thin Air: Dinosaurs, Birds, and Earth's Ancient Atmosphere* (Washington, D.C.: Joseph Henry Press, 2006). В данных работах содержится информация о сооружении гнезд на больших высотах.

P. Ward, *Out of Thin Air*.

M. Laurin and R. R. Reisz, «A Reevaluation of Early Amniote Phylogeny,» *Zoological Journal of the Linnean Society* 113, no. 2 (1995): 165–223.

P. Ward, Out of Thin Air.

C. Sidor et al., «Permian Tetrapods from the Sahara Show Climate-Controlled Endemism in Pangaea,» *Nature* 434 (2012): 886–89; S. Sahney and M. J. Benton, «Recovery from the Most Profound Mass Extinction of All Time,» *Proceedings of the Royal Society, Series B* 275 (2008): 759–65.

Окаменелости беспозвоночных животных в округе Мэйшань являются самыми хорошо изученными свидетельствами того ужасного события. Данный вопрос хорошо исследован здесь: S.-Z. Shen et al., «Calibrating the End-Penman Mass Extinction,» *Science* 334, no. 6061 (2011): 1367–72; Y. G. Jin et al., «Pattern of Marine Mass Extinction Near the Permian-Triassic Boundary in South China,» *Science* 289, no. 5478 (2000): 432–36.

C. R. Marshall, «Confidence Limits in Stratigraphy,» in D. E. G. Briggs and P. R. Crowther, eds., *Paleobiology II* (Oxford: Blackwell Scientific, 2001), 542–45; Также новые работы наших коллег из Аделаиды: C. J. A. Bradshaw et al., «Robust Estimates of Extinction Time in the Geological Record,» *Quaternary Science Reviews* 33 (2011): 14–19.

«End-Permian Extinction Happened in 60,000 Years — Much Faster than Earlier Estimates, Study Says,» Phys. org, February 10, 2014. S. D. Burgess et al., «High-Precision Timeline for Earth's Most Severe Extinction,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, no. 9 (2014): 3316–21.

L. Becker et al., «Impact Event at the Permian-Triassic Boundary: Evidence from Extraterrestrial Noble Gases in Fullerenes,» *Science* 291 (2001): 1530–33.

L. Becker et al., «Bedout: A Possible End-Permian Impact Crater Offshore of Northwestern Australia,» *Science* 304 (2004): 1469–76.

K. Grice et al., «Photic Zone Euxinia During the Permian-Triassic Superanoxic Event,» *Science* 307 (2005): 706–09.

C. Cao et al., «Biogeochemical Evidence for Euxinic Oceans and Ecological Disturbance Presaging the End-Permian Mass Extinction Event,» *Earth and Planetary Science Letters* 281 (2009): 188–201.

L. R. Kump and M. A. Arthur, «Inteqireting Carbon-Isotope Excursions: Carbonates and Organic Matter,» *Chemical Geology* 161 (1999): 181–98.

K. M. Meyer and L. R. Kump, «Oceanic Euxinia in Earth History: Causes and Consequences,» *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 36 (2008): 251–88.

T. J. Algeo and E. D. Ingall, «Sedimentary Corg: P Ratios, Paleoceanography, Ventilation, and Phanerozoic Atmospheric pO_2 » *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 256 (2007): 130–55; C. Wingudi and A. M. E. Winguth, «Simulating Permian-Triassic Oceanic Anoxia Distribution: Implications for Species Extinction and Recovery,» *Geology* 40 (2012): 127–30; S. Xie et al., «Changes in the Global Carbon Cycle Occurred as Two Episodes during the Permian-Triassic Crisis,» *Geology* 35 (2007): 1083–86; S. Xie et al., «Two Episodes of Microbial Change Coupled with Permo-Triassic Faunal Mass Extinction,» *Nature* 434 (2005): 494–97; G. Luo et al., «Stepwise and Large-Magnitude Negative Shift in $\delta^{13}C_{carb}$ Preceded the Main Marine Mass Extinction of the Permian-Triassic Crisis Interval,» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 299 (2011): 70–82; G. A. Brenneke et al., «Rapid Expansion of Oceanic Anoxia Immediately before the End-Permian Mass Extinction,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (2011): 17 631-34.

P. Ward et al., «Abrupt and Gradual Extinction Among Late Permian Land Vertebrates in the Karoo Basin, South Africa,» *Science* 307 (2005): 709–14; C. Sidor et al., «Permian Tetrapods from the Sahara Show Climate-Controlled Endemism in Pangaea»; S. Sahney and M. J. Benton, «Recovery from the Most Profound Mass Extinction of All Time».

R. B. Huey and P. D. Ward, «Hypoxia, Global Warming, and Terrestrial Late Permian Extinctions,» *Science*, 308, no. 5720 (2005): 398–401.

P. Ward et al., «Abrupt and Gradual Extinction Among Late Permian Land Vertebrates in the Karoo Basin, South Africa».

Высокие температуры в нижних слоях атмосферы триасового периода — основное доказательство того, что предположение о «парниковом массовом вымирании» верно.

S. Schoepfer et al., «Cessation of a Productive Coastal Upwelling System in the Panthalassic Ocean at the Permian-Triassic Boundary,» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 313–14 (2012): 181–88.

История коралловых рифов рассматривалась нами в главе, посвященной ордовикскому периоду. По этому вопросу наш главный эксперт — Джордж Стэнли. G. D. Stanley Jr., ed., *Paleobiology and Biology of Corals, Paleontological Society Papers*, vol. 1 (Boulder, CO: The Paleontological Society, 1996). Также внимания заслуживает и другая его работа «Кораллы и рифы: Кризис, Коллапс и Перемены» (*Corals and Reefs: Crises, Collapse and Change*), которая была представлена в виде краткого курса лекций Палеонтологического общества на собрании Геологического сообщества Америки в Миннеаполисе, 8 октября 2011 г.

P. C. Sereno, «The Origin and Evolution of Dinosaurs,» *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 25 (1997): 435–89; P. C. Sereno et al., «Primitive Dinosaur Skeleton from Argentina and the Early Evolution of Dinosauria,» *Nature* 361 (1993): 64–66; P. C. Sereno and A. B. Arcucci, «Dinosaurian Precursors from the Middle Triassic of Argentina: Lagerpeton chanarensis,» *Journal of Vertebrate Paleontology* 13 (1994): 385–99. Другие важные работы о ранних динозаврах и эволюции прочих позвоночных: M. J. Benton, «Dinosaur Success in the Triassic: A Noncompetitive Ecological Model,» *Quarterly Review of Biology* 58 (1983): 29–55; M. J. Benton, «The Origin of the Dinosaurs,» in C. A.-P. Salense, ed., *III Jornadas Internacionales sobre Paleontología de Dinosaurios y su Entorno* (Burgos, Spain: Salas de los Infantes, 2006), 11–19; A. P. Hunt et al., «Late Triassic Dinosaurs from the Western United States,» *Geobios* 31 (1998): 511–31; R. B. Trims et al., «A Late Triassic Dinosauriform Assemblage from New Mexico and the Rise of Dinosaurs,» *Science* 317 (2007): 358–61; R. B. Irmis et al., «Early Ornithischian Dinosaurs: The Triassic Record,» *Historical Biology* 19 (2007): 3–22; S. J. Nesbitt et al., «A Critical Re-evaluation of the Late Triassic Dinosaur Taxa of North America,» *Journal of Systematic Paleontology* 5 (2007): 209–43; S. J. Nesbitt et al., «Ecologically Distinct Dinosaurian Sister Group Shows Early Diversification of Ornithomiridae,» *Nature* 464 (2010): 95–98.

D. R. Carrier, «The Evolution of Locomotor Stamina in Tetrapods: Circumventing a Mechanical Constraint,» *Paleobiology* 13 (1987): 326–41.

E. Schachner, R. Cieri, J. Butler, G. Farmer, «Unidirectional Pulmonary Airflow Patterns in the Savannah Monitor Lizard,» *Nature* 506, no. 7488 (2013): 367–70.

A. F. Bennett, «Exercise Performance of Reptiles,» in J. H. Jones et al., eds., *Comparative Vertebrate Exercise Physiology: Phyletic Adaptations, Advances in Veterinary Science and Comparative Medicine*, vol. 3 (New York; Academic Press, 1994), 113–38.

N. Bardet, «Stratigraphic Evidence for the Extinction of the Ichthyosaurs,» *Terra Nova* 4 (1992): 649–56. См. также: C. W. A. Andrews, *A Descriptive Catalogue of the Marine Reptiles of the Oxford Clay. Based on the Leeds Collection in the British Museum (Natural History), London. Part II* (London: 1910): 1–205, также подробный обзор по данной теме в статье: R. Motani, «The Evolution of Marine Reptiles,» *Evolution: Education and Outreach* 2, no. 2 (2009): 224–35.

P. Ward et al., «Sudden Productivity Collapse Associated with the Triassic-Jurassic Boundary Mass Extinction,» *Science* 292 (2001): 115–19; P. Ward et al., «Isotopic Evidence Bearing on Late Triassic Extinction Events, Queen Charlotte Islands, British Columbia, and Implications for the Duration and Cause of the Triassic-Jurassic Mass Extinction,» *Earth and Planetary Science Letters* 224, nos. 3–4: 589–600. Более поздняя работа об исследованиях в Неваде и на островах Хайда-Гуай также хорошо раскрывает представления об изотопной аномалии. К. Н. Williford et al., «An Extended Stable Organic Carbon Isotope Record Across the Triassic-Jurassic Boundary in the Queen Charlotte Islands, British Columbia, Canada,» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 244, nos. 1–4 (2006): 290–96.

P. E. Olsen et al., «Ascent of Dinosaurs Linked to an Iridium Anomaly at the Triassic-Jurassic Boundary,» *Science* 296, no. 5571 (2002): 1305–07.

J. P. Hodych and G. R. Dunning, «Did the Manicougan Impact Trigger End-of-Triassic Mass Extinction?» *Geology* 20, no. 1 (1992): 51–54; L. H. Tanner et al., «Assessing the Record and Causes of Late Triassic Extinctions,» *Earth-Science Reviews* 65, nos. 1–2 (2004): 103–39; J.-H. Whiteside et al., «Compound-Specific Carbon Isotopes from Earths Largest Flood Basalt Eruptions Directly Linked to the End-Triassic Mass Extinction,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, no. 15 (2010): 6721–25; M. H. L. Deenen et al., «A New Chronology for the End-Triassic Mass Extinction,» *Earth and Planetary Science Letters* 291, no. 1–4 (2010): 113–25.

М.: Амфора, 2006.

При всем уважении к Бобу Баккеру, ни один человек, изучающий динозавров, не обойдется без чудесной книги: D. B. Weishampel et al., *The Dinosauria* (Oakland: University of California Press, 2004). Большая, увесистая и дорогая — она по-прежнему представляет собой один из основополагающих научных трудов по теме динозавров, даже в 2014 году.

В данный момент есть много источников, упоминающих воздушные мешки динозавров. Боб Баккер был первым, кто обратил на них внимание, а исследование Грегори Пола расширило уже имеющиеся наблюдения.

D. Fastovsky and D. Weishampel, *The Evolution and Extinction of the Dinosaurs* (Cambridge: Cambridge University Press: 2005).

P. O'Connor and L. Claessens, «Basic Avian Pulmonary Design and Flow Through Ventilation in Non-Avian Theropod Dinosaurs,» *Nature* 436, no. 7048 (2005): 253–56. Также представлено противоположное мнение: J. A. Ruben et al., «Pulmonary Function and Metabolic Physiology of Theropod Dinosaurs,» *Science* 283, no. 5401 (1999): 514–16.

W. J. Hillenius and J. A. Ruben, «The Evolution of Endothermy in Terrestrial Vertebrates: Who? When? Why?» *Physiological and Biochemical Zoology* 77, no. 6 (2004): 1019–1042. Другая важная работа: G. M. Erickson et al., «Tyrannosaur Life Tables: An Example of Nonavian Dinosaur Population Biology,» *Science* 313, no. 5784 (2006): 213–17; A. de Ricqlès et al., «On the Origin of High Growth Rates in Archosaurs and their Ancient Relatives: Complementary Histological Studies on Triassic Archosauriforms and the Problem of a „Phylogenetic Signal“ in Bone Histology,» *Annales de Paleontology* 94, no. 2 (2008): 57.

K. Carpenter, *Eggs, Nests, and Baby Dinosaurs: A Look at Dinosaur Reproduction* (Bloomington: Indiana University Press, 2000).

R. Takashima, «Greenhouse World and the Mesozoic Ocean,» *Oceanography* 19, no 4 (2006): 82–92.

A. S. Gale, «The Cretaceous World,» in S. J. Culver and P. F. Raqson, eds., *Biotic Response to Global Change: The Last 145 Million Years* (Cambridge: Cambridge University Press, 2006), 4–19.

T. J. Bralower et al., «Dysoxic-Anoxic Episodes in the Aptian-Albian (Early Cretaceous),» in *The Mesozoic Pacific: Geology, Tectonics and Volcanism*, M. S. Pringle et al., eds. (Washington, D.C.: American Geophysical Union, 1993), 5–37.

R. T. Huber et al., «Deep-Sea Paleotemperature Record of Extreme Warmth During the Cretaceous,» *Geology* 30 (2002): 123–26; A. H. Jahren, «The Biogeochemical Consequences of the Mid-Cretaceous Superplume,» *Journal of Geodynamics* 34 (2002): 177–91; I. Jarvis et al., «Microfossil Assemblages and the Cenomanian-Turonian (Late Cretaceous) Oceanic Anoxic Event,» *Cretaceous Research* 9 (1988): 3–103. Гетероморфные аммониты, способные держаться на плаву, описываются в работах П. Уорда и многих его коллег. Отличное начало для изучения этой темы — *Ammonoid Paleobiology*, Neil Landman et al., eds. (Springer, 1996). Пространственная ориентация бакулитов (род *Baculites*) была выявлена при помощи восковых чучел в натуральную величину, созданных Уордом в Университете МакМастер провинции Онтарио в Канаде в 1976 г.

Описание великолепного исследования (одного из многих!) Нейла Ландмана и его коллег приводится в следующей статье: N. H. Landman et al., «Methane Seeps as Ammonite Habitats in the U. S. Western Interior Seaway Revealed by Isotopic Analyses of Well-preserved Shell Material,» *Geology* 40, no. 6 (2012): 507. Другие открытия данной научной группы представлены здесь: N. H. Landman et al., «The Role of Ammonites in the Mesozoic Marine Food Web Revealed by Jaw Preservation,» *Science* 331, no. 6013 (2011): 70–72. Здесь впервые говорится о процессе питания аммонитов рода *Baculite*, а также об источниках их питания.

См. выше.

G. J. Vermeij, «The Mesozoic Marine Revolution: Evidence from Snails, Predators and Grazers,» *Palaeobiology* 3 (1977): 245–58.

S. M. Stanley, «Predation Defeats Competition on the Seafloor,» *Palaeobiology* 34, no. X (2008): 1–21.

T. Baumiller et al., «Post-Paleozoic Crinoid Radiation in Response to Benthic Predation Preceded the Mesozoic Marine Revolution,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107, no. 13 (2010): 5893–96.

T. Oji, «Is Predation Intensity Reduced with Increasing Depth? Evidence from the West Adantic Stalked Crinoid *Endoxocrinus parrae* (Gervais) and Implications for the Mesozoic Marine Revolution,» *Palaeobiology* 22 (1996): 339–51.

У. Гибсон, Б. Стерлинг. Машина различий / Пер. с англ. М. Пчелинцева. — Екатеринбург: У-Фактория, 2002.

L. W. Alvarez et al., «Extraterrestrial Cause for the Cretaceous-Tertiary Extinction,» *Science* 208, no. 4448 (1980): 1095. Позднее исследование было дополнено обнаружением самого кратера: A. R. Hildebrand et al., «Chicxulub Crater: A Possible Cretaceous-Tertiary Boundary Impact Crater on the Yucatan Peninsula, Mexico,» *Geology* 19 (1991): 867–71.

P. Schulte et al. «The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary,» *Science* 327, no. 5970 (2005): 1214–18.

J. Vellekoop et al., «Rapid Short-Term Cooling Following the Chicxulub Impact at the Cretaceous-Paleogene Boundary,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, no 21 (2014): 7537–7541. Обсуждение места падения и тенденций самого вымирания рассматривается во многих источниках, но мы порекомендуем следующий: P. Ward, *Under a Green Sky: Global Warming, the Mass Extinctions of the Past, and What They Can Tell Us About Our Future* (Washington, D.C.: Smithsonian. 2007).

Обратите внимание также на потрясающий обзор нашего коллеги: D. Jablonski, «Extinctions in the Fossil Record (and Discussion),» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series B* 344. 1307 (1994): 11–17.

D. M. Raup and D. Jablonski, «Geography of End-Cretaceous Marine Bivalve Extinctions,» *Science* 260, 5110 (1993): 971–73; P. M. Sheehan and D. E. Fastovsky, «Major Extinctions of Land-Dwelling Vertebrates at the Cretaceous-Tertiary Boundary, Eastern Montana,» *Geology* 20 (1992): 556–60; R. K. Bambach et al., «Origination, Extinction, and Mass Depletions of Marine Diversity,» *Palaeobiology* 30, no. 4 (2004): 522–42. D. J. Nichols and K. R. Johnson, *Plants and the K-T Boundary* (Cambridge: Cambridge University Press, 2008); P. Ward et al., «Ammonite and Inoceramid Bivalve Extinction Patterns in Cretaceous-Tertiary Boundary Sections of the Biscay Region (Southwestern France, Northern Spain),» *Geology* 19, no. 12 (1991): 1181–84; также, обратите внимание: N. MacLeod et al., «The Cretaceous-Tertiary Biotic Transition,» *Journal of the Geological Society* 154, no. 2 (1997): 265–92. Также: P. Shulte et al., «The Chiexulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary,» *Science* 327, no. 5970 (2010): 1214–18.

V. Courtillot et al., «Deccan Flood Basalts at the Cretaceous-Tertiary Boundary?» *Earth and Planetary Science Letters* 80, nos. 3–4 (1986): 361–74; C. Moskowitz, «New Dino-Destroying Theory Fuels Hot Debate,» *space, com*, October 18, 2009.

T. S. Tobin et al., «Extinction Patterns, $\delta^{18}\text{O}$ Trends, and Magnetostratigraphy from a Southern High-Latitude Cretaceous-Paleogene Section: Links with Deccan Volcanism,» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 350–52 (2012): 180–88.

Лучшей работой в области палеонтологических исследований позвоночных долгое время оставалась книга Роберта Кэрролла «*Vertebrate Paleontology and Evolution*» (New York: W. H. Freeman and Company, 1988). Существует также недавняя публикация о том, что в своей книге мы называем «третьей эрой млекопитающих»: O. R. P. Bininda-Emonds et al. «The Delayed Rise of Present-Day Mammals,» *Nature* 446, no. 7135 (2007): 507–11; Z.-X. Luo et al., «A New Mammaliaform from the Early Jurassic and Evolution of Mammalian Characteristics,» *Science* 292, 5521 (2001): 1535–40.

J. R. Wible et al., «Cretaceous Eutherians and Laurasian Origin for Placental Mammals Near the K-T Boundary,» *Nature* 447, no. 7147 (2007): 1003–6; M. S. Springer et al., «Placental Mammal Diversification and the Cretaceous Tertiary Boundary,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, no. 3 (2002): 1056–61.

K. Plelgen, «The Mammal Family Tree,» *Science* 334, no. 6055 (2011): 458–59.

Q. Ji et al., «The Earliest Known Eutherian Mammal,» *Nature* 416, no. 6883 (2002): 816–22.

Z.-X. Luo et al., «A Jurassic Eutherian Mammal and Divergence of Marsupials and Placentals.»
Nature 476, no. 7361 (2011): 442–45.

K. Jiang, «Fossil Indicates Hairy, Squirrel-sized Creature Was Not Quite a Mammal,» *Chicago News*, August 7, 2013; C. F. Zhou, «A Jurassic Mammaliaform and the Earliest Mammalian Evolutionary Adaptations,» *Nature* 500 (2013: 163–67).

Z.-X. Luo, «Transformation and Diversification in Early Mammal Evolution,» *Nature* 450, no. 7172 (2007): 1011–19.

J. P. Kennett and L. D. Stott, «Abrupt Deep-Sea Warming, Paleoceanographic Changes and Benthic Extinctions at the End of the Paleocene,» *Nature* 353 (1991): 225–29.

U. Rohl et al., «New Chronology for the Late Paleocene Thermal Maximum and Its Environmental Implications,» *Geology* 28, no. 10 (2000): 927–30; T. Westerhold et al., «New Chronology for the Late Paleocene Thermal Maximum and Its Environmental Implications,» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 257 (2008): 377–74.

P. L. Koch et al., «Correlation Between Isotope Records in Marine and Continental Carbon Reservoirs Near the Paleocene-Eocene Boundary,» *Nature* 358 (1992); 319–22.

M. D. Hatch, «C(4) Photosynthesis: Discovery and Resolution,» *Photosynthesis Research* 73, nos. 1–3 (2002): 251–56.

E. J. Edwards and S. A. Smith, «Phylogenetic Analyses Reveal the Shady History of G Grasses,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107, nos. 6 (2010): 2532–37; C. P. Osborne and R. P. Freckleton, «Ecological Selection Pressures for C₄ Photosynthesis in the Grasses,» *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 276, no. 1663 (2009): 1753–60.

Наше личное примечание к данной главе: один из нас (Питер Уорд) держал двух попугаев в качестве домашних животных (хотя в отношениях между человеком и птицей непонятно, кто кого содержит). При этом был очевиден уровень интеллекта попугаев. И подобное утверждение касается не только попугаев. Если понаблюдать за воронами или другими птицами, которые держатся стаями, можно заметить их удивительный и, более того, прогрессирующий интеллект. Забавно, что от птиц пошло уничижительное выражение «куриные мозги». Сравните размер нашего мозга с размером мозга жако и задумайтесь, что эти птицы могут строить предложения, заниматься простой арифметикой, и их поведение в целом очень сложно структурировано. Мы все надеемся на то, что курица, которую мы едим каждый день, крайне глупа. А вот, может, и нет!

K. Padian and L. M. Chiappe, «Bird Origins,» in P. J. Currie and K. Padian, eds., *Encyclopedia of Dinosaurs* (San Diego: Academic Press, 1997), 41–96; J. Gauthier, «Saurischian Monophyly and the Origin of Birds,» in K. Padian, *Memoirs of the California Academy of Sciences* 8 (1986): 1–55; L. M. Chiappe, «Downsized Dinosaurs: The Evolutionary Transition to Modern Birds,» *Evolution: Education and Outreach* 2, no. 2 (2009): 248–56.

J. H. Ostrom, «The Ancestry of Birds,» *Nature* 242, no. 5393 (1973): 136; J. Gauthier, «Saurischian Monophyly and the Origin of Birds,» in K. Padian, *Memoirs of the California Academy of Sciences* 8 (1986): 1–55; J. Cracraft, «The Major Clades of Birds,» in M. J. Benton, ed., *The Phylogeny and Classification of the Tetrapods, Volume I: Amphibians, Reptiles, Birds* (Oxford: Clarendon Press, 1988), 339–61.

A. Feduccia, «On Why the Dinosaur Lacked Feathers,» in M. K. Hecht et al., eds. *The Beginnings of Birds: Proceedings of the International Archaeopteryx Conference Eichstatt 1984* (Eichstatt: Freunde des Jura-Museums Eichstatt, 1985), 75–79; A. Feduccia et al., «Do Feathered Dinosaurs Exist? Testing the Hypothesis on Neontological and Paleontological Evidence,» *Journal of Morphology* 266, no. 2 (2005): 125–66.

J. O'Connor, «A Revised Look at Liaoningornis Longidigitris (Aves).» *Vertebrate PalAsiatica* 50 (2012): 25–37.

A. Feduccia, «Explosive Evolution in Tertiary Birds and Mammals,» *Science* 267, no. 5198 (1995): 637–38; A. Feduccia, «Big Bang for Tertiary' Birds?» *Trends in Ecology and Evolution* 18, no. 4 (2003): 172–76.

M. Norell and M. Ellison, *Unearthing the Dragon: The Great Feathered Dinosaur Discovery* (New York: Pi Press, 2005); R. Prum, «Are Current Critiques of the Theropod Origin of Birds Science? Rebuttal to Feduccia 2002,» *Auk* 120, no. 2(2003): 550–61; S. Hope, «The Mesozoic Radiation of Neornithes,» in L. M. Chiappe et al., *Mesozoic Birds: Above the Heads of Dinosaurs* (Oakland: University of California Press, 2002), 339–88; P. Ericson et al., «Diversification of Neoaves: Integration of Molecular Sequence Data and Fossils,» *Biology Letters* 2, no. 4 (2006): 543–47; K. Padian, «*The Origin and Evolution of Birds* by Alan Feduccia (Yale University Press, 1996),» *American Scientist* 85: 178–81; M. A. Norell et al., «Flight from Reason. Review of: *The Origin and Evolution of Birds* by Alan Feduccia (Yale University Press, 1996),» *Nature* 384, no. 6606 (1997): 230; L. M. Witmer, «The Debate on Avian Ancestry: Phylogeny, Function, and Fossils,» in L. M. Chiappe and L. M. Witmer, eds., *Mesozoic Birds: Above the Heads of Dinosaurs* (Berkeley: University of California Press, 2002), 3–30.

C. Peiji et al., «An Exceptionally Preserved Theropod Dinosaur from the Yixian Formation of China,» *Nature* 391, no. 6663 (1998): 147–52; G. S. Paul. *Dinosaurs of the Air: The Evolution and Loss of Flight in Dinosaurs and Birds* (Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2002), 472; X. Xu et al., «An Archaeopteryx like Theropod from China and the Origin of Avialae,» *Nature* 475 (2011): 465–70.

D. Hu et al., «A Pre-*Archaeopteryx* Troodontid Theropod from China with Long Feathers on the Metatarsus,» *Nature* 461, no. 7264 (2009): 640–43; A. H. Turner et al., «A Basal Dromaeosaurid and Size Evolution Preceding Avian Flight,» *Science* 317, no. 5843 (2007): 1378–81; X. Xu et al., «Basal Tyrannosauroids from China and Evidence for Protofeathers in Tyrannosauroids,» *Nature* 431, 7009 (2004): 680–84; C. Foth, «On the Identification of Feather Structures in Stem-Line Representatives of Birds: Evidence from Fossils and Actuopalaeontology,» *Palaontologische Zeitschrift* 86, no. 1 (2012): 91–102; R. Prum and A. H. Brush, «The Evolutionary Origin and Diversification of Feathers,» *Quarterly Review of Biology* 77, no. 3 (2002): 261–95.

M. H. Schweitzer et al., «Soft-Tissue Vessels and Cellular Preservation in *Tyrannosaurus rex*,» *Science* 307, no. 5717 (2005); C. Dal Sasso and M. Signore, «Exceptional Soft-Tissue Preservation in a Theropod Dinosaur from Italy,» *Nature* 392, no. 6674(1998): 383–87; M. H. Schweitzer et al., «Heme Compounds in Dinosaur Trabecular Bone,» *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 94, no. 12 (1997): 6291–96.

Dr. Paul Willis, «Dinosaurs and Birds: The Story,» The Slab,
<http://www.abc.net.au/science/slab/dinobird/story.htm>.

J. A, Clarke et al., «Insight into the Evolution of Avian Flight from a New Clade of Early Cretaceous Omithurines from China and the Morphology of *Yixianomis grabau*,» *Journal of Anatomy* 208 (3 (2006): 287–308.

N. Brocklehurst et al., «The Completeness of the Fossil Record of Mesozoic Birds: Implications for Early Avian Evolution,» *PLOS One* (2012); J. A. Clarke et al., «Definitive Fossil Evidence for the Extant Avian Radiation in the Cretaceous,» *Nature* 433 (2005): 305–8.

L. Witmer, «The Debate on Avian Ancestry: Phylogeny, Function and Fossils,» in L. Chiappe et al., eds., *Mesozoic Birds: Above the Heads of Dinosaurs* (Berkeley, California: University of California Press, 2002), 3–30; L. M. Chiappe and C. J. Dyke, «The Mesozoic Radiation of Birds,» *Annual Review of Ecology and Systematics* 33 (2002): 91–124; J. W. Brown et al., «Strong Mitochondrial DNA Support for a Cretaceous Origin of Modern Avian Lineages,» *BMC Biology* 6 (2008): 1–18; J. Cracraft, «Avian Evolution, Gondwana Biogeography and the Cretaceous-Tertiary Mass Extinction Event,» *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences* 268 (2001): 459–69; S. Hope, «The Mesozoic Radiation of Neornithes,» in L. M. Chiappe et al., eds., *Mesozoic Birds: Above the Heads of Dinosaurs* (Berkeley: University of California Press, 2002), 339–88; Z. Zhang et al., «A Primitive Confuciusornithid Bird from China and Its Implications for Early Avian Flight,» *Science in China Series D* 51, no. 5 (2008): 625–39.

N. R. Longrich et al., «Mass Extinction of Birds at the Cretaceous-Paleogene (K-Pg) Boundary,» *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108 (2011): 15 253-57; G. Mayr, *Paleogene Fossil Birds* (Berlin; Springer, 2009), 262; J. A. Clarke et al., «Definitive Fossil Evidence for the Extant Avian Radiation in the Cretaceous,» *Nature* 433 (2005): 305–8; T. Fountaine, et al., «The Quality of the Fossil Record of Mesozoic Birds,» *Proceedings of the Royal Academy of Sciences B-Biological Science* 272 (2005): 289–94.

P. Ericson et al. «Diversification of Neoaves: Integration of Molecular Sequence Data and Fossils,» *Biology Letters* 2, no.4 (2006): 543–47; см. также. W. Brown et al., «Nuclear DNA Does Not Reconcile „Rocks“ and „Clocks“ in Neoaves: A Comment on Ericson et al.,» *Biology Letters* 3, no. 3 (2007): 257–20; A. Suh et al., «Mesozoic Retroposons Reveal Parrots as the Closest Living Relatives of Passerine Birds,» *Nature Communications* 2, no. 8 (2011).

K. J. Mitchell et al., «Ancient DNA Reveals Elephant Birds and Kiwi Are Sister Taxa and Clarifies Ratite Bird Evolution,» *Science* 344, no. 6186 (2014): 898–900.

P. Ward, *Rivers in Time* (New York: Columbia University Press, 2000).

R. Leakey and R. Lewin, *The Sixth Extinction* (Norwell, MA: Anchor Press, 1996).

«*Lucy's Legacy: The Hidden Treasures of Ethiopia*,» Houston Museum of Natural Science, 2009.

D. Johanson and M. Edey, *Lucy, the Beginnings of Humankind* (Granada: St. Albans, 1981);
W. L. Jungers, «Lucy's Length: Stature Reconstruction in *Australopithecus afarensis* (A. L.288–1) with
Implications for Other Small-Bodied Hominids,» *American Journal of Physical Anthropology* 76, no.
2 (1988): 227–31.

B. Yirka, «Anthropologist Finds Large Differences in Gait of Early Human Ancestors,» Phys.org, 12 ноября, 2012; P. A. Kramer, «Brief Communication: Could Kadanuumuu and Lucy Have Walked Together Comfortably?» *American Journal of Physical Anthropology* 149 (2012): 616–20; P. A. Kramer and D. Sylvester, «The Energetic Cost of Walking: A Comparison of Predictive Methods,» *PLoS One* (2011).

D. J. Green and Z. Alemseged, «*Australopithecus afarensis* Scapular Ontogeny, Function, and the Role of Climbing in Human Evolution,» *Science* 335, no. 6106 (2012): 514–17.

J. P. Noonan, «Neanderthal Genomics and the Evolution of Modern Humans,» *Genome Res.* 20, no. 5 (2010): 547–53.

K. Prufer et al., «The Complete Genome Sequence of a Neanderthal from the Altai Mountains,»
Nature 505, no. 7451 (2014): 43–49.

P. Mellars, «Why Did Modern Human Populations Disperse from Africa ca. 60,000 Years Ago?»
Proceedings of the National Academy of Sciences 103, no. 25 (2006): 9381–86.

P. Ward, *The Call of Distant Mammoths: What Killed the Ice Age Mammals* (Copernicus, Springer-Verlag, 1997).