

ГЛАВА 1

Что такое жизнь?

С ОРОК ДВА РАДИОТЕЛЕСКОПА В ГОРАХ НА СЕВЕРЕ Калифорнии не спускают глаз с неба. Проект *SETI* (*Search for Extraterrestrial Intelligence*, “поиск внеземного разума”) полвека — безуспешно — ловит сигналы от других цивилизаций. Даже подвижники уже не особенно надеются на успех. Впрочем, несколько лет назад, когда у *SETI* иссякли деньги, после обращения к публике средства были собраны и Антенная решетка Аллена вновь заработала. Мне кажется, в этом проекте воплощено неясное, тревожное чувство потерянности человека во Вселенной. Его работа наводит на мысли о хрупкости научного подхода как такового. Он дает нам иллюзию всеведения. Современные технологии настолько сложны, что почти уже неотличимы от научной фантастики. Тем прочнее укореняется наивная надежда, что мы не одни во Вселенной (ведь существа с других планет — частый атрибут жанра). Однако не стоит забывать, что эта надежда не имеет под собой научной основы.

Но даже если телескопы никогда не обнаружат жизнь вне нашей планеты, они не бесполезны. Может быть, вообще невозможно смотреть в эти телескопы неправильным образом и все

способы верны, потому что настоящая их польза в другом. Что мы ищем в космосе? Найдутся ли где-нибудь разумные формы жизни, настолько похожие на нас, что они также будут пользоваться радиосвязью? Считаем ли мы, что основой живой материи обязательно должен быть углерод? Является ли вода необходимой составляющей жизни? А кислород? Эти вопросы на самом деле должны быть обращены не к инопланетной жизни, а к земной — почему она именно такая, какой мы ее видим. Но до биологов эти вопросы доходят, лишь отразившись от тарелок радиотелескопов. Проблема в том, что суть науки — это предсказания. Главные вопросы физики — *почему* физические законы таковы, какими мы их знаем, какие фундаментальные принципы определяют устройство Вселенной. В биологии нет законов, сопоставимых по предсказательным способностям с физическими. Даже эволюционная биология в этом отношении ужасающе неточна. Мы располагаем подробнейшими сведениями о молекулярных механизмах эволюции и об истории жизни на нашей планете. Но при этом мы не знаем, что в истории земной жизни — следствие случайности, а что, напротив, обусловлено физическими законами.

Нельзя сказать, что за эти проблемы никто не брался. На этом поле ведут игру крупнейшие ученые, в том числе нобелевские лауреаты, но, несмотря на остроту их ума и познания, им так и не удалось прийти к согласию. Сорок лет назад, в начале эры молекулярной биологии, французский биолог Жак Моно написал знаменитую книгу “Случайность и необходимость”, полную доводов в пользу того, что жизнь возникла благодаря редчайшему стечению обстоятельств и что мы, скорее всего, одиноки в мертвой Вселенной. Последние строки этой книги — близкий к поэзии сплав науки и метафизики:

Древние скрижали разбиты. Человек знает наконец, что одинок в равнодушной необъятности Вселенной, в которой появился благодаря случайности. Древние заветы ничего не ска-

жут ни о его судьбе, ни о его предназначении. Царствие Небесное или тьма под ногами — выбирать ему самому.

Тогда же появились люди, которые придерживались противоположной точки зрения. Они считали, что происхождение жизни — это неизбежный результат космохимических процессов. Согласно этой гипотезе, жизнь способна зарождаться почти везде и довольно быстро. Но предположим, что на какой-нибудь планете начинает развиваться жизнь: к чему приведет это развитие? И на этот вопрос у нас нет четкого ответа. Может быть, разные пути развития жизни, подчиняясь физическим ограничениям, независимо приведут примерно к одним и тем же результатам. Так, гравитация вынуждает способных к полету существ быть легкими и обладать чем-то вроде крыльев. Еще более сильное заключение — что эволюция неизбежно должна привести к возникновению клеток: блоков, содержимое которых отделено от окружающей среды. Если такие закономерности универсальны, то инопланетная жизнь должна напоминать земную. С другой стороны, развитие жизни зависит и от случайности. Например, в результате глобальных катаклизмов наблюдается эффект “бутылочного горлышка”. Именно такой эффект проявился после падения метеорита, из-за которого вымерли динозавры. Мысленно пустим время вспять и перенесемся на полмиллиарда лет, в кембрийский период, когда в палеонтологической летописи появляются животные. Если позволить миру повторить свое развитие начиная с этого момента, будет ли он похож на наш? Кто знает! Возможно, в параллельной реальности Земля населена гигантскими сухопутными осьминогами.

Одна из причин направлять телескопы в космическое пространство состоит в том, что здесь, на Земле, мы имеем дело только с земными процессами. Мы располагаем единственным примером того, как может выглядеть жизнь, а значит, не можем предсказывать закономерности развития, опираясь на статисти-

ческие данные. Мы не можем сказать, что именно определяло (если определяло) ход эволюции жизни, поскольку нам не с чем ее сравнить. Правда, если сказать об этом было бы совсем нечего, написание моей книги (как и многих других) потеряло бы смысл. Законы физики повсюду во Вселенной одни и те же. То же касается химических элементов и их свойств — и, значит, химические процессы также универсальны. У земной жизни много странных свойств, например половое размножение и старение. Если бы мы знали, каким образом химический состав и другие базовые свойства Вселенной влияют на ход событий, это заменило бы большую выборку: мы сумели бы указывать, исходя из базовых принципов, вероятность приобретения тех или иных свойств и, в конечном счете, смогли бы объяснить, почему жизнь такова, какой мы ее знаем. Впрочем, жизнь на Земле трудно счесть *единственным примером*: это бесконечное многообразие организмов, эволюционирующих в неограниченной временной перспективе. Но все же теория эволюции не способна объяснить, почему развитие жизни пошло именно этим путем. Я вовсе не хочу сказать, что теория эволюции неверна. Она верна, однако не обладает достаточной предсказательной силой. Идея этой книги следующая: есть действительно важные факторы, определяющие ход эволюции, и это — энергетические ограничения. Рассматривая жизнь с позиции этих ограничений, мы можем вывести из базовых принципов некоторые из ее фундаментальных свойств. Прежде чем перейти к рассмотрению этих ограничений, стоит обсудить, почему эволюционная биология обладает слабой предсказательной силой и почему мы долгое время едва ли замечали существование проблемы энергетических ограничений. Лишь в последние годы стало ясно (пока только тем, кто следит за развитием эволюционной биологии), что в центре биологической науки — ошеломительный пробел.

В этом состоянии дел мы можем винить ДНК. Забавно, что эра современной молекулярной биологии со всеми ее впечатля-

ющими технологиями, по сути, началась с физики, точнее, с книги Эрвина Шредингера “Что такое жизнь?” (1944). Шредингер осветил два самых существенных момента. Во-первых, жизнь каким-то образом противостоит общей тенденции распада — повышению энтропии, предписываемого вторым началом термодинамики. Вторая очень важная идея Шредингера такова: жизнь смогла уклониться от этого закона благодаря генетическому материалу. Шредингер предугадал, что генетический материал представляет собой “аперриодический кристалл”, структура которого не является строго повторяющейся и поэтому может функционировать как “код”. (Считается, что это первое употребление данного термина в биологической литературе.) Шредингер, подобно большинству биологов того времени, считал, что обсуждаемый квазикристалл должен представлять собой белок, однако Уотсон и Крик обнаружили, что ДНК подходит на эту роль куда лучше*. В 1953 году в своей второй статье в журнале “Нейчур” они указывали: “Таким образом, вероятно, определенная последовательность оснований является кодом, который содержит генетическую информацию”. Эта фраза — краеугольный камень современной биологии. Биология в нынешнем мире — это информация, геномные последовательности, хранящиеся в компьютерах, а жизнь — преобразования информации.

Изучение геномов открыло нам целый мир, чудесный и таинственный. Бесконечные строки кода (в случае нашего генома — 3 млрд символов) можно читать, как постмодернистский роман. Местами он представляет собой нарратив, перемежающийся повторами, стихами, пустыми страницами, потоком сознания, своеобразной пунктуацией. Лишь менее 2 % нашего генома кодирует белки. Несколько больше отведено под регуляторные механизмы. Рассуждение же о функциях остальной

* Генетическая роль ДНК еще в 1944 году показана Освальдом Эйвери, Колином Мак-Леодом и Маклином Мак-Карти. — *Прим. науч. ред.*

части генома может подвигнуть моих любезных коллег на нескончаемый спор, поэтому я не буду об этом говорить (кроме того, для нас это не так важно)*. Мы знаем, что геномы могут кодировать десятки тысяч генов и хранить информацию об огромном числе изолированных регуляторных механизмов, контролирующих такие сложные процессы, как превращение гусеницы в бабочку или взросление человека. Сравнительный анализ геномов животных, растений, грибов и одноклеточных амёб показывает, что процессы в этих организмах очень схожи. Несмотря на то, что их геномы чрезвычайно различаются по размеру и структуре, мы имеем дело с вариантами одних и тех же генов, регуляторных элементов, эгоистичных репликаторов (например вирусов) и одними и теми же участками некодирующих повторов. Геномы лука, пшеницы и амёбы размерами превосходят наш и содержат больше генов. Размеры геномов амфибий, например лягушек и саламандр, могут отличаться друг от друга более чем на два порядка: геном некоторых видов саламандр больше нашего в 40 раз, а размер генома некоторых лягушек едва достигает трети размера генома человека. Если коротко описать наложенные на геном архитектурные ограничения, то получится: “Ничего невозможного”.

Это очень важно. Ведь если геном — это информация и не существует фундаментальных ограничений его структуры и размера, — значит, у закодированной в геноме информации ограничений также нет. Разумеется, это не означает, что на геном не наложены *никакие* ограничения. На него воздействует естественный

* Сейчас много спорят о функциональности некодирующей ДНК. Некоторые ученые утверждают, что вся некодирующая ДНК несет полезную нагрузку и поэтому от термина “мусорная ДНК” необходимо отказаться. А сторонники теории “мусорной ДНК” приводят в ее защиту “луковый тест”: если полезна большая доля некодирующей ДНК, то почему у лука ее в пять раз больше, чем у человека? На мой взгляд, от термина “мусорная ДНК” пока отказываться не стоит. Ведь не всякий “мусор” следует немедленно нести на помойку: куда проще и практичнее хранить его у себя в гараже. Вполне возможно, он вам еще пригодится.

отбор. В геноме происходит множество случайных процессов: генные, хромосомные и полногеномные дупликации, инверсии, делеции и встраивание паразитической ДНК. Во что все это выльется, зависит от многих факторов, например от экологической ниши организма, межвидовой конкуренции и размера популяции. Нам кажется, что влияние этих факторов нельзя предугадать, что они просто часть среды. Если бы все ее параметры были точно известны, то, может быть, мы смогли бы предсказать размер генома некоторых организмов. Но на деле мы сталкиваемся с бесконечным множеством видов, обитающих в бесконечно разнообразных условиях: внутри чужих клеток, в городах, в океанских глубинах под огромным давлением. Так что ограничения, наложенные на геном, лучше сформулировать так: “Возможно все”. Видимо, разнообразие геномов определяется разнообразием факторов среды. Структура геномов не позволяет увидеть будущее, но может рассказать о прошлом: с чем пришлось столкнуться организму за историю его развития.

Вернемся к иным мирам. Если основа жизни — это информация и она ничем не ограничена, то невозможно предсказать, как может быть устроена жизнь на другой планете — за исключением того, что она не должна противоречить законам физики. Стоит появиться некоему носителю наследственной информации (ДНК или нечто похожее), как на эволюцию перестают действовать информационные ограничения. И тогда определить ее путь становится невозможным: его будут определять условия среды, предшествующие случайные события и давление отбора. Но если мы вернемся с небес на Землю, то увидим, что это утверждение справедливо, когда мы говорим о невероятном разнообразии современных организмов, но не годится для большей части истории планеты. Судя по всему, существовали ограничения, которые невозможно сформулировать исходя из данных геномов, предшествующей истории и условий среды, но они миллиарды лет контролировали развитие жизни.

КРАТКАЯ ИСТОРИЯ ПЕРВЫХ ДВУХ МИЛЛИАРДОВ ЛЕТ ЖИЗНИ

Нашей планете около четырех с половиной миллиардов (иначе говоря, 4500 млн) лет. В юности ей пришлось нелегко: не исполнилось ей и 700 млн лет, как она пережила Позднюю метеоритную бомбардировку (тогда Солнечная система приходила в себя после формирования). Земля испытала колоссальной силы столкновение с астрономическим объектом размером с Марс, в результате которого, вероятно, появилась Луна*. Земная кора непрерывно трансформируется из-за геологической активности, но нетронутая древняя поверхность Луны хранит свидетельства бомбардировки в виде кратеров. Это было выяснено по датировке осколков лунных скал, привезенных астронавтами проекта “Аполлон”.

Хотя на Земле нет горных пород сопоставимого возраста, есть и другие способы получить представление об условиях на древней Земле. Так, состав цирконов (крошечные, меньше песчинок, кристаллы силиката циркония, нередкие в горных породах) позволяет предположить, что океаны появились на Земле гораздо раньше, чем считалось. На основании датировки уран-свинцовым методом можно сказать, что некоторые из этих удивительно прочных кристаллов образовались 4,4–4 млрд лет назад, а затем в виде зерен вошли в состав осадочных пород. Кристаллы цирконов надежно сохраняют внутри химические вещества, которые попали туда еще на стадии формирования кристаллов, а значит, можно определить, в каких условиях это происходило. Химический состав древних цирконов указывает на то, что они образовались при относительно низких температурах и в присутствии

* Это произошло не в Позднюю бомбардировку, а значительно раньше, в первые 100 млн лет существования Солнечной системы. — *Прим. науч. ред.*

воды. Не слишком похоже на одну из тех жутких картин вулканического ада, каким художники любят изображать гадейский период (катархей). Кристаллы циркона говорят обратное: это был относительно спокойный водный мир с редкими островами.

Результаты изучения цирконов не подтверждают и ту давнюю гипотезу, что атмосфера древней Земли была наполнена метаном, водородом и аммиаком и они, реагируя друг с другом, формировали органические молекулы. Некоторые редкоземельные элементы, например церий, представлены в составе цирконов в основном своей окисленной формой. Высокое содержание церия свидетельствует о том, что атмосфера в то время состояла главным образом из окисленных газов вулканического происхождения: диоксида углерода, водяного пара, азота и диоксида серы. Эта смесь по составу не отличалась от современной атмосферы — за исключением того, что в ней вплоть до возникновения фотосинтеза отсутствовал кислород. Реконструкция облика давно исчезнувшего мира опирается лишь на состав песчинок, но это гораздо лучше, чем совсем ничего. Это довод в пользу того, что древняя Земля была удивительно похожа на нынешнюю. Внезапное вмешательство астероида могло повлечь частичное испарение океанов, но вряд ли это могло сильно повредить бактериям, живущим в глубине (если, конечно, к тому времени они успели эволюционировать).

Самые ранние свидетельства жизни столь же эфемерны: едва различимые ее следы обнаружены в горных породах комплексов Исуа и Акилия (около 3,8 млрд лет) на юго-западе Гренландии (рис. 2). Эти следы представляют собой не окаменевшие организмы и даже не сложные молекулы организменного происхождения (*биомаркеры*). Это просто графит со смещенным соотношением типов углеродных атомов. Углерод состоит из двух стабильных типов атомов — изотопов, которые немного отличаются друг

от друга по массе*. Ферменты (белки, катализирующие реакции в клетках) охотнее взаимодействуют с легким изотопом углерода ^{12}C , поэтому именно он накапливается в живых организмах. Можно представить, что атомы углерода двух типов — это мячики для пинг-понга, которые немного отличаются по массе. Более легкие мячики ^{12}C отскакивают чуть быстрее и поэтому имеют больше шансов столкнуться с ферментами и войти в состав органических веществ. Содержание тяжелого ^{13}C в природном углероде составляет лишь 1,1 %. Этот изотоп хуже усваивается живыми организмами и поэтому накапливается в океанах и включается в карбонатные осадочные породы, например в известняк. Эти мелкие различия изотопного состава используются как диагностический признак для обнаружения следов жизни. Изотопному фракционированию в живых клетках подвергаются не только углерод, но и железо, азот и сера. В углистых включениях в Исуа и Акилии обнаружено смещение изотопных составов и этих элементов.

Каждый пункт этих исследований можно поставить под сомнение: от датировки горных пород до самого существования графитовых гранул, в которых видят следы жизни. Более того, выяснилось, что смещение изотопного состава, вероятно, связано не только с деятельностью живых организмов. Фракционирование изотопов, которое мы принимаем за проявление жизни, может быть следствием геологических процессов в гидротермальных источниках. И даже если возраст горных пород Гренландии определен верно и они действительно содержат углерод со смещенным изотопным составом, то это еще не доказывает, что тогда существовала жизнь. Впрочем, не стоит расстраиваться: по большому счету, никакой разницы нет. Беру на себя смелость утверждать, что различие между “живой”, геологически активной пла-

* Существует и третий изотоп — ^{14}C . Он нестабилен и подвергается радиоактивному распаду, период его полураспада — 5570 лет. Радиоуглеродный метод датирования часто используют для определения возраста археологических находок, но для больших промежутков времени, о которых идет речь в этой книге, он не подходит.

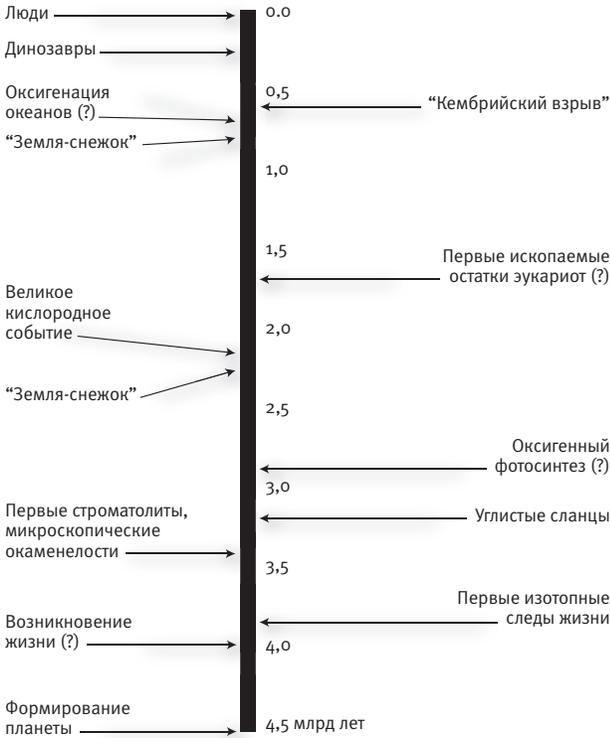


Рис. 2. Этапы развития жизни на Земле.

На шкале отражены примерные даты ключевых событий (млрд лет). Многие датировки остаются спорными, но ясно, что бактерии и археи появились на 1,5-2 млрд лет раньше эукариот.

нетой и живой клеткой — лишь вопрос установления того, что такое “жизнь”. Никаких четких границ между ними нет: геохимия и биохимия плавно переходят друг в друга. Можно считать, что указанные горные породы заполняют пропасть между геологией и биологией. Живая планета и произведенная ею жизнь представляют собой единое целое.