

Судьба жизни на Земле решалась примерно 2,6 млрд лет назад. Величайший экологический кризис совпал с крупнейшим эволюционным скачком. Будь катастрофа чуть сильнее, планета навсегда могла бы остаться безжизненной. Будь она слабее — возможно, бактерии и по сей день были бы единственными обитателями Земли...

Появление эукариот — живых клеток, обладающих ядром, — второе по значимости (после зарождения самой жизни) событие биологической эволюции. О том, когда, как и почему появилось клеточное ядро, и пойдет речь.

Жизнь на Земле прошла долгий путь развития от первой живой клетки до млекопитающих и человека. На этом пути было немало эпохальных событий, сделано множество великих открытий и гениальных изобретений. Какое из них было самым главным? Может быть, формирование человеческого мозга или выход животных на сушу? А может быть, появление многоклеточных организмов? Ученые тут почти единодушны: величайшим достижением эволюции стало появление клеток современного типа — с ядром, хромосомами, вакуолями и прочими органами, труднопроизносимые названия которых мы смутно помним со школьной скамьи. Тех самых клеток, из которых состоит в том числе и наше тело.

А вначале клетки были совсем другими. Не было у них ни ядер, ни вакуолей, ни других «органов», а хромосома была всего одна, и имела она форму кольца. Так и по сей день устроены клетки бактерий — первых обитателей Земли. Между этими первичными клетками и современными, усовершенствованными — пропасть куда большего размера, чем между медузой и человеком. Как же природе удалось преодолеть ее?

Бактериальный мир

Миллиард лет, а то и больше, Земля была царством бактерий. Уже в самых древних осадочных породах земной коры (их возраст 3,5 миллиарда лет) обнаружены остатки синезеленых водорослей, или цианобактерий. Эти микроскопические организмы процветают и поныне. За миллиарды лет они почти не изменились. Это они окрашивают воду в озерах и прудах в яркий голубовато-зеленый цвет, и тогда говорят, что «вода цветет». Синезеленые водоросли — отнюдь не самые примитивные из бактерий. От зарождения жизни до появления цианобактерий, скорее всего, прошли многие миллионы лет эволюции. К сожалению, никаких следов тех древнейших эпох в земной коре не сохранилось: беспощадное время и геологические катаклизмы уничтожили,

переплавив в раскаленных недрах, все осадочные породы, возникшие в первые сотни миллионов лет существования Земли.

Цианобактерии — организмы не только древние, но и заслуженные. Именно они «изобрели» хлорофилл и фотосинтез. Их незаметный труд в течение многих миллионов лет постепенно обогатил океан и атмосферу кислородом, что сделало возможным появление настоящих растений и животных. Поначалу весь кислород уходил на окисление растворенного в океане железа. Окисленное железо выпадало в осадок: так образовались крупнейшие залежи железных руд. Только когда с железом было «покончено», кислород стал накапливаться в воде и поступать в атмосферу.

Не менее миллиарда лет цианобактерии были безраздельными хозяевами Земли и почти единственными ее обитателями. Дно Мирового океана было устлано голубовато-зелеными коврами. В этих коврах, цианобактериальных матах, вместе с синезелеными жили и другие бактерии. Все они были прекрасно приспособлены и друг к другу и к суровым условиям первобытного океана. В то время — архейскую эру (архей) — на Земле было очень жарко. Богатая углекислым газом атмосфера создавала мощный парниковый эффект. Из-за этого к концу архея Мировой океан нагрелся до 50—60 °С. Растворяясь в воде, углекислый газ превращался в кислоту; горячие кислые воды облучались жестким ультрафиолетом (ведь у Земли еще не было современной атмосферы со спасительным озоновым щитом). Вдобавок в воде было растворено огромное количество ядовитых солей тяжелых металлов. Постоянные извержения вулканов, выбросы пепла и газов, резкие колебания условий окружающей среды — все это отнюдь не упрощало жизнь первым обитателям планеты.

Развившиеся в такой негостеприимной среде бактериальные сообщества были невероятно выносливыми и устойчивыми. Из-за этого их эволюция шла очень медленно. Они уже были приспособлены почти ко всему, и им незачем было совершенствоваться. Чтобы жизнь на Земле начала развиваться и усложняться, требовалась катастрофа. Необходимо было разрушить этот сверхустойчивый бактериальный мир, казавшийся вечным и нерушимым, чтобы освободить жизненное пространство для чего-то нового.

Планетная катастрофа — образование земного ядра

Долгожданная революция, положившая конец затянувшемуся застою и выведшая жизнь из бактериального «тупика», произошла 2,7—2,5 миллиардов лет назад, в самом конце архейской эры. Российские геологи О.Г. Сорохтин и С.А. Ушаков, авторы новейшей физической теории развития Земли, рассчитали, что в это время наша планета подверглась самому крупному и катастрофическому преобразованию за всю свою историю.

По их гипотезе, причиной катастрофы стало возникновение у нашей планеты железного ядра. С момента образования Земли до конца архея в верхних слоях мантии накапливалась расплавленная смесь железа и его двухвалентного оксида (FeO). Примерно 2,7 миллиарда лет назад масса этого расплава превысила некий порог, после чего тяжелая, вязкая, раскаленная жидкость буквально «провалилась» к центру Земли,

вытеснив оттуда ее первичную, более легкую сердцевину. Эти грандиозные перемещения огромных масс вещества в недрах планеты разорвали и смяли ее тонкую поверхностную оболочку — земную кору. Повсюду извергались вулканы. Древние материки сблизилась, столкнулись и слились в единый суперматерик Моногею — как раз над тем местом, где жидкое железо протекло в глубь планеты. Вышедшие на поверхность глубинные породы вступили в химическую реакцию с атмосферным углекислым газом, и очень скоро в атмосфере почти не осталось углекислоты. Парниковый эффект стал гораздо слабее, что привело к сильнейшему похолоданию: температура океана упала от +60 °С до +6. Столь же внезапно и резко снизилась кислотность морской воды.

Это была величайшая из катастроф. Но даже она не смогла уничтожить цианобактерий. Они выжили, хотя им и пришлось по-настоящему туго. Исчезновение углекислотной атмосферы означало для них жестокий голод, ведь цианобактерии, как и высшие растения, используют углекислоту как сырье для синтеза органических веществ. Бактериальных матов стало меньше. От сплошных голубых ковров, выстилавших морское дно, остались обрывки. Бактериальный мир не погиб, но был сильно потрепан, в нем появились «дыры» и «бреши». Именно в этих «брешах» и «пробоинах» древнего мира и зародились в ту давнюю эпоху первые организмы с принципиально иным строением — более сложные и совершенные одноклеточные существа, которым предстояло стать новыми хозяевами планеты.

Появление клеточного ядра

Бактериальная клетка — сложная живая конструкция. Но клетки высших организмов — растений, животных, грибов и даже так называемых простейших (амеб, инфузорий) — устроены намного сложнее. У бактериальной клетки нет ни ядра, ни каких-либо иных внутренних «органов», окруженных оболочкой. Поэтому бактерии называют «прокариотами» (что в переводе с греческого означает «доядерные»). У высших организмов клетка имеет ядро, окруженное двойной оболочкой (отсюда название «эукариоты», т. е. имеющие выраженное ядро), а также «внутренние органы», важнейшие из которых — митохондрии (своеобразные энергетические станции). Митохондрии расщепляют органические вещества до углекислого газа и воды, используя кислород в качестве окислителя. Мы дышим исключительно для того, чтобы обеспечить кислородом митохондрии наших клеток. Кроме митохондрий, важнейшими органами эукариотической клетки оказываются пластиды (хлоропласты), служащие для фотосинтеза, которые есть только у растений.

Но главное в эукариотической клетке — это, конечно, ее ядро. В ядре хранится наследственная информация, записанная четырехбуквенным языком генетического кода в молекулах ДНК. У бактерий, разумеется, тоже есть ДНК — единственная молекула в форме кольца, содержащая все гены данного вида бактерий. Но бактериальная ДНК лежит прямо во внутренней среде клетки — в ее цитоплазме, где протекает активный обмен веществ. Это значит, что непосредственное окружение драгоценной молекулы напоминает химический завод или лабораторию алхимика, где ежесекундно появляются и исчезают сотни тысяч самых разнообразных веществ. Каждое из них потенциально

может повлиять на наследственную информацию, а также на те молекулярные механизмы, которые эту информацию считывают и «воплощают в жизнь». В таких «антисанитарных» условиях нелегко создать эффективную и надежную «систему обслуживания» — хранения, чтения, воспроизведения и ремонта ДНК. Еще труднее создать молекулярный механизм, который мог бы «осмысленно» (сообразуясь с обстановкой) управлять работой такой системы.

Именно в этом и состоял великий смысл обособления клеточного ядра. Гены оказались надежно изолированы от цитоплазмы с ее бурлящей химией. Теперь можно было в «спокойной обстановке» наладить эффективную систему их регуляции. И тут оказалось, что при одном и том же наборе генов клетка может вести себя совершенно по-разному в разных условиях.

Как хорошо известно, одну и ту же книгу можно прочесть по-разному (особенно если книга хорошая). В зависимости от подготовки, настроения и жизненной ситуации читатель в первый раз найдет в книге одно, а перечитав ее через год, — совсем другое. Так же и с геномом эукариот. В зависимости от условий он «считывается» по-разному, и клетки, развивающиеся в итоге этого «прочтения», тоже оказываются разными. Так появился механизм ненаследственной приспособительной изменчивости — «изобретение», намного повысившее устойчивость и жизнеспособность организмов.

Без этой системы регуляции генов никогда бы не появились многоклеточные животные и растения. Ведь вся суть многоклеточного организма в том и состоит, что генетически идентичные клетки в зависимости от условий становятся разными — берут на себя выполнение различных функций, образуют разные ткани и органы. Прокариоты (бактерии) на это не способны принципиально.

Как приспособляются к меняющимся условиям бактерии? Они быстро мутируют и обмениваются друг с другом генами. Подавляющее большинство их гибнет, но, поскольку бактерий очень много, всегда есть вероятность, что кто-то из мутантов окажется жизнеспособным в новых условиях. Способ надежный, но чудовищно расточительный. И главное — тупиковый. При такой стратегии нет никаких причин усложняться, совершенствоваться. Бактерии не способны к прогрессу. Потому-то современные бактерии почти не отличаются от архейских.

Древнейшие следы присутствия эукариот обнаружены в осадочных породах возрастом около 2,7 миллиарда лет. Это как раз то время, когда у Земли образовалось железное ядро. По-видимому, катастрофа, едва не разрушившая бактериальный мир, заставила земную жизнь всерьез «задуматься» о поиске новых, лучших способов приспособления к меняющейся среде. Жизнь не может стоять на месте, она обречена на вечное совершенствование. Так появление земного ядра, возможно, стало причиной появления ядра клеточного.

Чудеса интеграции, или Может ли коллектив стать единым организмом

Еще в начале XX века ученые заметили, что пластиды и митохондрии по своему

строению удивительно напоминают бактерий. Почти век ушел на сбор фактов и доказательств, но теперь уже можно считать твердо установленным, что эукариотическая клетка возникла в результате сожительства (симбиоза) нескольких разных бактериальных клеток.

С пластидами и митохондриями, по правде говоря, все было ясно уже давно. Эти «органы» эукариотической клетки имеют собственную кольцевую ДНК — в точности такую же, как у бактерий. Они самостоятельно размножаются внутри хозяйской клетки, просто делясь пополам, как это принято у прокариот. Они никогда не образуются заново, «из ничего». По всем признакам они самые настоящие бактерии. Причем можно даже точно сказать, какие именно: митохондрии напоминают так называемые альфа-протеобактерии, а пластиды — уже знакомые нам цианобактерии. Эти прославленные «изобретатели» хлорофилла и фотосинтеза так и «не поделились» ни с кем своим «открытием»: они и по сей день, став важной внутренней частью клеток растений, держат под своим «контролем» практически весь фотосинтез на планете (а значит, и почти все производство органических веществ и кислорода!).

Но откуда взялась сама клетка-хозяин? Какой микроб был ее «предком»? Среди ныне живущих бактерий кандидата на эту роль долго не могли найти. Дело в том, что гены эукариот, заключенные в клеточном ядре, резко отличаются по своей структуре от генов большинства бактерий: они состоят из множества отдельных «смысловых» кусков, разделенных длинными «бессмысленными» участками ДНК. Чтобы «прочитать» такой ген, все его кусочки нужно аккуратно «вырезать» и «склеить». Ничего подобного у обычных бактерий не наблюдается.

К удивлению ученых, «эукариотическое» строение генома, а также многие другие уникальные особенности эукариот обнаружались у самой странной и загадочной группы прокариотических организмов — археобактерий. Эти существа отличаются невероятной устойчивостью: они могут жить даже в кипящей воде геотермальных источников. У некоторых археобактерий оптимальная для жизни температура лежит в диапазоне +90 ÷ —110 °С, а при +80 °С они уже начинают замерзать.

Сейчас большинство ученых считают, что эукариотическая клетка возникла в результате того, что какая-то археобактерия (возможно, приспособленная к жизни в кислой и горячей воде) приобрела внутриклеточных сожителей-симбионтов из числа обычных бактерий.

Специалисты долго не могли понять, как археобактерии удалось «проглотить» своих будущих сожителей — ведь прокариоты не могут заглатывать крупные частицы. Но недавно у бактерий был открыт внутриклеточный паразитизм. Оказалось, что некоторые микробы способны проделывать отверстия в клеточной стенке других бактерий и проникать в их цитоплазму. Может быть, именно так проникли будущие пластиды и митохондрии внутрь клетки-хозяина?

Приобретение внутриклеточных сожителей привело к тому, что в одной клетке оказалось несколько разных геномов. Ими нужно было как-то управлять. Создание

такого руководящего центра клетки — клеточного ядра — стало жизненной необходимостью. По одной из гипотез, ядерная оболочка могла возникнуть как случайный результат несогласованной работы нескольких групп генов, отвечавших за формирование клеточных оболочек у только что объединившихся бактерий.

Разнообразные микробы, давшие начало эукариотической клетке, вовсе не сразу слились в единый организм. Сначала они просто жили вместе в одном бактериальном сообществе, постепенно приспосабливаясь друг к другу и участь извлекать выгоду из такого сожительства. Выделяемый цианобактериями кислород был для них ядовит. В ходе эволюции они «придумали» много разных способов борьбы с этим побочным продуктом своей жизнедеятельности. Одним из таких способов и стало... дыхание. Недавние исследования показали, что комплекс белков-ферментов, отвечающий за кислородное дыхание митохондрий, возник в результате небольшого изменения ферментов фотосинтеза. Ведь с точки зрения химии, фотосинтез и кислородное дыхание — это одна и та же химическая реакция, только идущая в противоположных направлениях:

CO₂ + H₂O + энергия → органические вещества.

Так в цианобактериальных матах могли появиться полезные сожители — микробы, способные дышать. Они не только забирали излишек кислорода, но еще и вырабатывали огромное количество энергии — достаточное, чтобы поделиться с соседями.

Третий участник сообщества — археобактерии. Они могли забирать у цианобактерий излишки органики, сбраживать их и тем самым переводить в форму, более «удобоваримую» для дышащих бактерий.

Подобные микробные сообщества можно встретить и сегодня. Жизнь бактерий в таких сообществах протекает на удивление дружно и слаженно. Микробы «научились» даже обмениваться особыми химическими сигналами, чтобы лучше координировать свои действия. Кроме того, они активно обмениваются генами. Кстати, именно эта способность так мешает борьбе с инфекционными болезнями: стоит какой-нибудь одной бактерии в результате случайной мутации приобрести ген устойчивости к новому антибиотику, как очень скоро и другие виды бактерий могут приобрести этот ген путем обмена. Все это делает бактериальное сообщество похожим на единый организм.

Видимо, катастрофические события конца архейской эры заставили микробные сообщества пройти еще дальше по пути интеграции. Клетки разных видов бактерий, давно уже «притертые» и приспособленные друг к другу, стали объединяться под общей оболочкой. Это было необходимо для максимально слаженной, централизованной регуляции жизненных процессов в условиях кризиса.

Сообщество превратилось в организм. Индивидуумы слились воедино, отказавшись от самостоятельности во имя создания новой индивидуальности высшего порядка.

Кирпичики

Излюбленный аргумент противников теории эволюции — невозможность создать новую сложную структуру (например, новый ген) путем перебора случайных вариантов (мутаций). Антиэволюционисты утверждают, что с той же вероятностью смерч, пронесшийся над городской свалкой, может собрать из мусора и обломков космический корабль. И они совершенно правы!

Но только крупные эволюционные преобразования, по-видимому, идут вовсе не путем перебора бесчисленных мелких, случайных мутаций. На примере происхождения эукариотической клетки — а это, как уже отмечалось, крупнейшее эволюционное событие со времен появления жизни — хорошо видно, как Природа, создавая нечто принципиально новое, сложное, прогрессивное, умело пользуется уже готовыми, испытанными «кирпичиками», собирая из них, как из конструктора, новый организм. По-видимому, этот «блочный» принцип сборки новых живых систем пронизывает собой всю биологическую эволюцию и во многом определяет ее темп и особенности. По этому принципу (из крупных, заранее заготовленных и проверенных блоков) строятся и новые гены, и белки, и новые группы организмов. (Кстати, гены археобактерий и эукариот поделились на отдельные куски, скорее всего, именно с этой целью: такие блоки очень удобно перекомбинировать.)

Наука неуклонно приближается к новому видению Природы. Постепенно мы начинаем понимать, что все живое вокруг нас — вовсе не случайный набор видов и форм, а сложный и единый организм, развивающийся по своим непреложным законам. Любой живой организм, любая живая клетка, да и мы сами — кирпичики в великом «конструкторе» Природы. И каждый из таких кирпичиков может оказаться незаменимым.