

Капра Фритьоф - Паутина жизни. Новое научное понимание живых систем

Пер. с англ. под ред. В. Г. Трилиса. — К.: «София»; М.: ИД «София», 2003. — 336 с.

Это третья научно-популярная книга известного ученого-физика, посвященная самым фундаментальным вопросам науки — причинам и законам бытия живой и неживой материи.

Стремясь к научному разрешению загадки жизни, автор предпринимает попытку синтеза новейших достижений и открытий в физике, математике, биологии и социологии. Проблемы самоорганизации сложных систем, расшифровки генетического кода, передачи и использования биологической информации и другие волнующие задачи *физики живого* рассматриваются с единой методологической позиции, не исключающей внимательного отношения к научной, философской и мистической мысли различных эпох и цивилизаций.

Книга адресована широкому кругу серьезных читателей, в том числе старшим школьникам, студентам и преподавателям.

ISBN 5-9550-0044-5

Вот что мы знаем:

Все вещи связаны между собой

Подобно тому, как кровь

Связывает членов одной семьи...

Что бы ни происходило с Землей,

Происходит с ее сыновьями и дочерьми.

Человек не прядет паутину Жизни;

Он сам лишь паутинка в ней.

И что бы ни делал он с паутиной,

Делает это с самим собой.

Тед Перри, вдохновленный Вождем Сизтлом

Предисловие

В 1944 году австрийский физик-теоретик Эрвин Шредингер написал небольшую брошюру, озаглавленную «*Что есть жизнь?*», в которой выдвинул ясную и убедительную гипотезу относительно молекулярной структуры генов. Эта книга побудила биологов по-новому осмыслить генетику и тем самым способствовала появлению новой области науки — молекулярной биологии.

В последующие десятилетия новая научная дисциплина обогатилась рядом триумфальных открытий, кульминацией которых явилась разгадка тайны генетического кода. Однако все эти впечатляющие успехи не приблизили биологов к ответу на вопрос, сформулированный в заглавии книги Шредингера. Не в состоянии они были ответить и на множество других связанных с этой темой вопросов, которые озадачивали ученых и философов на протяжении столетий. Каким образом из случайного набора молекул развиваются сложные структуры? Какова природа взаимосвязи между разумом и мозгом? Что такое сознание?

Специалисты по молекулярной биологии обнаружили фундаментальные «кирпичики» жизни, однако это не помогло им понять интегративные механизмы деятельности живых организмов. Четверть века назад один из ведущих биологов, Сидни Бреннер, писал:

С одной стороны, всю работу, выполненную генетиками и биологами за последние шестьдесят лет, можно считать продолжительной интерлюдией... Теперь, когда программа завершена, мы, пройдя полный круг, вернулись все к тем же нерешенным проблемам. Каким образом искалеченный организм регенерирует точно такую же структуру, какая была прежде? Каким образом яйцо формирует организм?.. Я полагаю, что в ближайшие четверть века нам придется обучать биологов новому языку... Я еще не знаю, как назвать его; и никто не знает... Вероятно, неправомерно считать, что вся логика сосредоточена на молекулярном уровне. Возможно, нам придется выйти за пределы часовых механизмов¹.

С тех пор как Бреннер опубликовал эти комментарии, действительно возник новый язык для понимания и описания сложных высокоинтегрированных живых систем. Ученые называют его по-разному — теория динамических систем, теория сложных систем, нелинейная динамика, сетевая динамика и т. д. Хаотические аттракторы, фракталы, диссипативные структуры, самоорганизация, сети автопоэза — вот лишь некоторые ключевые понятия этого языка.

Такого подхода к пониманию жизни придерживаются выдающиеся ученые и их последователи во всем мире; Илья Пригожий из

Брюссельского университета, Умберто Матурана из Чилийского университета в Сантьяго, Франциско Варела из Эколь Политехник в Париже, Линн Маргулис из Массачусетского университета, Бенуа Мандельбро из Йельского университета и Стюарт Кауффман из Института Санта-Фе — вот лишь несколько имен. Некоторые важнейшие открытия этих ученых, опубликованные в профессиональных журналах и книгах, были признаны революционными.

До сих пор, однако, никто не предложил общую систему, которая объединила бы все новые открытия, тем самым, позволяя отчетливо понять их суть даже непосвященным читателям. Эта задача стала причиной и целью книги *«Паутина жизни»*.

В новом понимании жизни следует видеть передовую линию науки в борьбе за смену парадигм, за переход от механистического мировоззрения к экологическому, которое я обсуждал в предыдущей книге, *«Поворотный пункт»*. Настоящую книгу можно считать в некотором смысле продолжением и расширением главы «Системный взгляд на жизнь» из книги *«Поворотный пункт»*.

Интеллектуальная традиция системного мышления, а также модели и теории живых систем, разработанные в первой половине XX века, образуют концептуальный и исторический фундамент научной структуры, обсуждаемой в этой книге. В сущности, предложенный здесь синтез современных теорий и моделей можно считать наброском нарождающейся теории живых систем, которая предполагает единый взгляд на разум, материю и жизнь.

Книга предназначена для широкого круга читателей. Я старался по возможности упростить технический аспект книги; специальные термины поясняются по мере их появления. Однако идеи, модели и теории, которые я обсуждаю, достаточно сложны, поэтому иногда, чтобы не исказить их суть, приходилось вдаваться и в технические детали. В особенности это относится к некоторым местам в главах 5 и 6, а также к первой части главы 9. Читатели, не интересующиеся техническими подробностями, могут читать эти части «по диагонали» или попросту опустить их, не опасаясь утратить основную нить моей аргументации.

Читатель заметит также, что текст не только опирается на обширную библиографию, но и содержит большое количество внутренних ссылок на другие страницы этой книги. Поставив перед собой задачу, донести до читателя всю сложную сеть понятий и идей в условиях линейных ограничений письменного языка, я почувствовал целесообразность этой системы внутренних взаимосвязей. Надеюсь, читатель поймет, что, как и паутина жизни, эта книга тоже представляет собой единое целое, превышающее сумму своих частей.

Беркли, август 1995 Фритъоф Каира
ПРИМЕЧАНИЯ К ПРЕДИСЛОВИЮ

¹ Цитируется по Judson (1979), pp. 209, 220.

БЛАГОДАРНОСТИ

Представленный в этой книге синтез понятий и идей вызревал более десяти лет. За эти годы мне посчастливилось обсуждать важнейшие научные модели и теории с их авторами и другими учеными, работающими в этой области. Особенно я благодарен:

- Илье Пригожину за две вдохновенные беседы в начале 80-х годов. Они были посвящены его теории диссипативных структур;
- Франциско Вареле за то, что он во время горнолыжного отпуска в Швейцарии объяснил мне теорию Сантьяго, трактующую автопоэз и обучение; а также за многочисленные просветительские беседы в течение последнего десятилетия о когнитивистике и ее приложениях;
- Умберто Матуране за две весьма стимулирующие беседы в середине 1980-х годов, касающиеся познания и сознания;
- Ральфу Эбрему за прояснение многочисленных вопросов из области математики сложных систем;
- Линн Маргулис за воодушевляющий диалог в 1987 году о Гайя-гипотезе и за то, что она побудила меня опубликовать материалы по моей системе синтеза, которая тогда лишь зарождалась;
- Джеймсу Лавлоку за недавнюю плодотворную дискуссию по широкому спектру научных идей;
- Хайнцу фон Форстеру за беседы об истории кибернетики и истоках понятия самоорганизации;
- Кэндейс Перт за многочисленные и весьма результативные дискуссии, касающиеся ее исследований пептидов;
- Арне Наэссу, Джорджу Сешнсу, Уорвику Фоксу и Гарольду Глассеру за философские беседы; а также Дугласу Томкинсу, побудившему меня серьезно заняться серьезной экологией;
- Гейл Фляйшекер за содержательную переписку и телефонные разговоры о различных аспектах автопоэза; а также Эрнсту Калленбаху, Эду Кларку, Реймонду Дэссмену, Леонарду Дюлю, Элану Миллеру, Стефани Миллз и Джону Райану за многочисленные беседы и переписку о принципах экологии.

В последние годы, пока я работал над этой книгой, мне представилось несколько драгоценных возможностей вынести мои идеи на суд коллег и студентов. Я весьма признателен Сатишу Кумару, который три года подряд (1992—94) приглашал меня в колледж Шумахера читать курс по «Паутине жизни», и всем студентам, посещавшим эти летние курсы, за их бесконечные критические вопросы и полезные предложения. Я также благодарен Стивену Хардингу за учебные семинары по Гайя-гипотезе,

проведенные в рамках моего курса, и за его великодушную помощь в разъяснении многочисленных вопросов по биологии и экологии. С благодарностью вспоминаю помощь в исследованиях, оказанную мне студентами колледжа Шумахера Уильямом Холлоуэем и Мортеном Флатау.

Во время работы в Центре экологической грамотности в Беркли я мог всесторонне обсуждать с преподавателями особенности системного мышления и принципы экологии, что значительно прояснило мои представления об этих концепциях и идеях. Особо хочу поблагодарить Зенобию Барлоу за организацию диалогов по экологической грамотности, во время которых обычно и происходили эти беседы.

Уникальной была также возможность выносить отдельные части этой книги на обсуждение в ходе «системных салонов», которые регулярно устраивала Джоанна Мэйси в 1993-95 годы. Я чрезвычайно благодарен Джоанне и моим коллегам, Тайрон Кэшман и Брайану Суимму, за глубокое обсуждение многочисленных идей в ходе этих встреч в узком кругу.

Мне хотелось бы поблагодарить моего литературного агента, Джона Брокмана, за его поддержку и помощь в формировании первоначального плана этой книги, которую он же представлял издателям.

Я очень благодарен своему брату, Бернту Капре, а также Трене Клиленд, Стивену Хардингу и Уильяму Холлоуэю за то, что они взяли на себя труд прочитать мою рукопись и дать мне ценные советы и указания. Хочу также поблагодарить Джона Тодда и Раффи за комментарии к отдельным главам.

Особую благодарность выражаю Джулии Понсонби за ее великолепные рисунки и то терпение, с которым она выслушивала мои постоянные просьбы об изменениях в них.

Благодарю моего редактора Чарльза Конрада из *Anchor Books* за его энтузиазм и ценные подсказки.

И последнее, но не по важности. Я глубоко признателен моей жене Элизабет и дочери Джульетте за их понимание и терпение, когда в течение долгих лет я так часто покидал их общество и *убегал вверх*, где часами писал эту книгу.

ЧАСТЬ I

КУЛЬТУРНЫЙ КОНТЕКСТ

Глава 1 Глубокая экология: новая парадигма

Это книга о новом научном понимании жизни на всех ее уровнях — организмов, социальных систем и экологических систем. Оно основано на новом восприятии реальности, глубоко влияющем не только на науку и философию, но и на бизнес, политику, здравоохранение, образование и повседневную жизнь. Поэтому уместно начать нашу работу с обзора широкого социального и культурного контекста новой концепции жизни.

Кризис представлений

По мере того как XX век приближается к завершению, вопросы состояния окружающей среды приобретают первостепенное значение. Мы столкнулись с целым рядом глобальных проблем. Биосфере и самой человеческой жизни наносится такой урон, динамика которого очень скоро может стать необратимой. Мы располагаем достаточным количеством документов, подтверждающих уровень и значение этого урона¹.

Чем больше мы изучаем основные язвы нашего времени, тем больше убеждаемся в том, что их нельзя осмыслить по отдельности. Это системные проблемы, то есть взаимосвязанные и взаимозависимые. Например, стабилизация населения мира осуществима только в том случае, если повсеместно будет снижен уровень бедности. Вымирание разных видов животных и растений в мировом масштабе будет продолжаться, пока Южное полушарие будет страдать под бременем многочисленных долгов. Недостаточность ресурсов и деградация среды обитания смыкаются с ростом населения, что приводит к развалу местных сообществ, к этническому и племенному насилию — главным особенностям периода, сменившего эпоху холодной войны.

В конечном счете, эти проблемы следует рассматривать как разные грани единого кризиса, который является, прежде всего, кризисом представлений. Он обусловлен тем, что большинство из нас и, в особенности, наши крупные социальные институты придерживаются концепций устаревшего мировоззрения, представлений, неадекватных сегодняшнему перенаселенному, глобально взаимосвязанному миру.

Решения основных проблем нашего времени *существуют*, некоторые из них даже элементарно просты. Однако они требуют радикального сдвига в наших представлениях, в мышлении, в системе наших ценностей. Мы стоим на пороге фундаментальных перемен в научном и социальном мировоззрении, смены парадигм, по своей радикальности сравнимой с революцией Коперника. Но понимание этого еще даже не забрезжило в сознании большинства политических лидеров.

Необходимость признания полного изменения представлений и мышления — если мы хотим выжить — еще не доходит ни до корпоративной элиты, ни до администраторов и профессоров крупных университетов.

Наши руководители не только не в силах понять, каким образом взаимосвязаны различные проблемы; они отказываются видеть влияние своих так называемых решений на жизнь будущих поколений. С системной точки зрения, жизнеспособны только «устойчивые» [sustainable] решения. Понятие устойчивости стало ключевым в концепции экологического движения; и оно действительно кардинально. Лестер Браун из Института всемирных наблюдений (Worldwatch Institute) дал простое, ясное и красивое определение: «Устойчивое общество — это общество, которое удовлетворяет свои потребности, не ущемляя перспектив последующих поколений»². Это и есть крепкий орешек, великий вызов нашего времени: создать устойчивые сообщества, т. е. социальные и культурные среды, в которых мы сможем удовлетворять свои устремления и потребности, не урезая при этом возможностей будущих поколений.

Сдвиг парадигмы

Мои основные интересы как ученого всегда устремлялись в сферу тех радикальных перемен в понятиях и идеях, которые происходили в физике в течение трех первых десятилетий XX века и поныне продолжают в современных теориях материи. Новые концепции в физике обусловили значительный сдвиг в нашем мировоззрении: от механистического мировоззрения Декарта и Ньютона мы переходим к холистическому, экологическому взгляду.

Новый взгляд на мир отнюдь не легко было принять физикам начала века. Изучение атомного и субатомного мира привело их к контакту с необычной и неожиданной реальностью. Вникая в сущность этой новой реальности, ученые с трудом осознали, что их базовые понятия, их язык, да и сам способ мышления, оказываются неадекватными при описании атомных явлений. Их проблемы не остались чисто интеллектуальными: очень скоро они достигли уровня интенсивного и, можно сказать, экзистенциального кризиса. Этот кризис пришлось долго преодолевать, но в конце концов ученые были вознаграждены более глубоким проникновением в природу материи и в ее связь с разумом человека³.

Драматические перемены, происшедшие в физике в начале этого века, почти пятьдесят лет широко обсуждались в кругу физиков и философов. Эти дискуссии привели Томаса Куна к понятию *научной парадигмы*, определяемому им как «совокупность достижений... понятий, ценностей, технологий и т. д. ...разделяемых научным сообществом и используемых

этим сообществом для определения настоящих проблем и их решений»⁴. Изменения парадигм, по Куну, происходят скачкообразно, в форме революционных взрывов, и называются *сдвигами парадигм*.

В наши дни, более чем четверть века спустя после появления работы Куна, мы понимаем, что сдвиг парадигмы в физике является неотъемлемой частью более широкой культурной трансформации. Интеллектуальный кризис среди исследователей квантовой физики в 20-е годы сегодня отзывается подобным, но более обширным культурным кризисом. Соответственно, то, что мы наблюдаем, является сдвигом парадигм не только в рамках науки, но также и на огромной социальной арене⁵. Чтобы проанализировать культурную трансформацию, я обобщил определение Куна, данное им применительно к научной парадигме, распространив его на социальную парадигму, которую определяю как «совокупность понятий, ценностей, представлений и практик, разделяемая сообществом и формирующая определенное видение реальности, на основе которого сообщество организует само себя»⁶.

Парадигма, теперь постепенно сдающая свои позиции, доминировала в нашей культуре на протяжении нескольких столетий. Именно она сформировала современное западное общество и в значительной мере повлияла на остальную часть населения планеты. Эта парадигма включает в себя определенный набор глубоко укоренившихся идей и ценностей. Среди них: взгляд на Вселенную как на некую механическую систему, скомпонованную из элементарных «строительных» блоков; взгляд на человеческое тело как на машину; взгляд на жизнь в обществе как на конкурентную борьбу за выживание; убежденность в том, что неограниченный материальный прогресс достигается путем экономического и технологического развития; и, наконец, последнее, но не менее важное, — убежденность в том, что общество, в котором женщина повсеместно считается существом «второго сорта», следует естественному закону природы. Последние события роковым образом бросают вызов всем этим убеждениям, поэтому сейчас действительно происходит их радикальный пересмотр.

Глубокая экология

Новую парадигму можно назвать холистическим мировоззрением, взглядом на мир как на единое целое, а не собрание разрозненных частей. Ее также можно назвать экологическим взглядом, если термин «экологический» использовать в гораздо более широком и глубоком смысле, чем обычно. Глубокое экологическое осознание признает взаимозависимость всех феноменов и тот факт, что, как индивиды и члены общества, мы все включены в циклические процессы природы и в конечном счете зависимы от них.

Два термина, «холистический» и «экологический», слегка различаются по своему значению. По-видимому, «холистический» меньше подходит для описания новой парадигмы. Применять холистический подход, например, к велосипеду — значит видеть в велосипеде функционально целое и понимать взаимозависимость его частей, соответственно. Экологический взгляд включает и этот подход, однако он добавляет представление о том, каким образом велосипед соотносится с окружающей природной и социальной средой — откуда пришло сырье, из которого он изготовлен, как его производят, как его использование влияет на природную среду и на то сообщество, в котором его используют, и т. д. Это различие между «холистическим» и «экологическим» становится еще более ощутимым, когда мы говорим о живых системах, для которых связи с окружающей средой неизмеримо важнее.

Тот смысл, в котором я использую термин «экологический», связан с общественным движением, известным как *глубокая экология* и быстро набирающим силу⁷. Соответствующая философская школа была основана норвежским философом Арне Наэссом в начале 70-х, когда он разделил экологию на *поверхностную* [shallow] и *глубокую* [deep]. Это различие в настоящее время широко принято как очень полезная терминология для различения основных направлений в рамках современной экологической мысли.

Поверхностная экология антропоцентрична, ориентирована на человека. Она помещает человека над природой или вне ее. Человек рассматривается как источник всех ценностей, а природе приписывается лишь инструментальная и потребительская ценность. Глубокая экология не отделяет людей — и ничто другое — от природного окружения. Она видит мир не как собрание изолированных объектов, но как сеть феноменов, которые фундаментально взаимосвязаны и взаимозависимы. Глубокая экология признает изначальную ценность всех живых существ и рассматривает людей лишь как особую паутинку в паутине жизни.

В конечном счете, глубокое экологическое осознание — это осознание духовное, или религиозное. Когда понятие человеческого духа понимается как тип сознания, при котором индивид ощущает свою принадлежность к непрерывности, к всеобъемлющему космосу, становится ясно, что экологическое осознание духовно в своей глубочайшей сути. Таким образом, не удивительно, что возникающее новое видение реальности, основанное на осознании глубокой экологии, согласуется с так называемой «вечной философией» духовных традиций, будь то христианская или буддийская мистика или философия и космология, лежащая в основе традиций американских индейцев⁸.

Арне Наэсс отмечает и другой аспект глубокой экологии. «Суть глубокой экологии, — говорит он, — состоит в том, чтобы задавать более глубокие вопросы»⁹. В этом же заключается суть сдвига парадигмы. Нам нужно быть готовыми к тому, чтобы подвергать сомнению каждый отдельный аспект старой парадигмы. В конце концов, нам не придется отбрасывать все на свете, но мы должны помнить, что под вопросом должно стоять все. Итак, глубокая экология задает серьезные вопросы по поводу самих основ нашего современного научного, индустриального, ориентированного на рост материалистического мировоззрения и образа жизни. Она опрашивает всю парадигму с экологической точки зрения: с точки зрения наших отношений друг с другом, с будущими поколениями и с паутиной жизни, частью которой мы все являемся.

Социальная экология и экофеминизм

Помимо глубокой экологии, существуют еще две важные философские школы — социальная экология и феминистская экология, или *экофеминизм*. В последние годы на страницах философских журналов развернулась оживленная дискуссия по поводу относительных достоинств глубокой экологии, социальной экологии и экофеминизма¹⁰. Мне кажется, что каждая из этих трех школ обращается к важным аспектам экологической парадигмы, и, вместо того чтобы конкурировать друг с другом, их последователям следовало бы свести свои подходы в единое разумное экологическое видение.

Осознание глубокой экологии, очевидно, обеспечивает идеальную философскую и духовную основу, как для экологического образа жизни, так и для деятельности по защите окружающей среды. К сожалению, оно почти не раскрывает те культурные особенности и структуры социальной организации, которые обусловили современный экологический кризис. На этом аспекте концентрирует свои усилия социальная экология¹¹.

Общей чертой различных школ социальной экологии является признание и понимание глубоко антиэкологической природы многих наших социальных и экономических структур и их технологий; их антиэкологичность заключена в том, что Ризн Айслер назвал *доминаторной системой* социальной организации¹². Патриархальный уклад, империализм, капитализм и расизм — вот примеры социального господства, эксплуативного и антиэкологичного по своей сути. Среди многочисленных школ социальной экологии существуют марксистские и анархистские группировки, которые используют свои концептуальные модели для анализа различных вариантов *социального господства*.

Экофеминизм можно рассматривать как особую школу социальной

экологии, поскольку он тоже обращается к основной динамике социального доминирования в контексте патриархальности. Тем не менее, его культурологический анализ многочисленных граней патриархальности и связей между феминизмом и экологией выходит далеко за рамки социальной экологии. Экофеминисты видят в патриархальном господстве мужчины над женщиной прототип всех видов господства и эксплуатации в их различных иерархических, милитаристских, капиталистических и индустриальных проявлениях. Они отмечают, в частности, что эксплуатация природы шла нога в ногу с эксплуатацией женщины, которая издревле олицетворяла природу. Извечная связь между женщиной и природой обусловила непрерывную параллель между историей женщин и историей окружающей среды; она же послужила источником естественного родства между феминизмом и экологией¹³. Соответственно, экофеминисты видят в эмпирическом женском знании важнейший источник экологического видения реальности¹⁴.

Новые ценности

В этом кратком наброске нарождающейся экологической парадигмы я пока отметил лишь сдвиги в представлениях и мышлении. Если бы этим исчерпывались все необходимые перемены, переход к новой парадигме происходил бы гораздо легче. Движение глубокой экологии объединяет внушительную когорту ярких мыслителей, которые могли бы надежно убедить наших политических и корпоративных лидеров в преимуществах нового мышления. Но это лишь полдела. Сдвиг парадигм требует совершенствования не только наших представлений и мышления, но и самой системы ценностей.

И здесь интересно отметить поразительную связь между переменами в мышлении и изменением ценностей. Оба эти процесса можно рассматривать как сдвиг от самоутверждения к интеграции. Эти тенденции — самоутверждающая и интегративная — представляют собой два важнейших аспекта любой живой системы¹⁵. Ни один из них по своей сущности не является ни хорошим, ни плохим. Хорошее, или здоровое, характеризуется динамическим равновесием; плохое, или болезненное, обусловлено нарушением равновесия — переоценкой одной тенденции и пренебрежением другой. Обращаясь теперь к нашей западной индустриальной культуре, мы видим явную переоценку самоутверждения и недооценку интегрирования. Это с очевидностью доминирует и в нашем мышлении, и в системе наших ценностей. Весьма поучительно сопоставить эти противоположные тенденции:

Мышление

Ценности

<i>Самоутверждающее</i>	<i>Интегративное</i>	<i>Самоутверждающие</i>	<i>Интегративные</i>
-------------------------	----------------------	-------------------------	----------------------

Рациональное	интуитивное	экспансия	консервация
анализ	синтез	конкуренция	кооперация
редукционистское	холистическое	количество	качество
линейное	нелинейное	господство	партнерство

Анализируя эту таблицу, мы можем заметить, что самоутверждающие ценности — конкуренция, экспансия, господство — ассоциируются, как правило, с мужчинами. Действительно, в патриархальном обществе мужчины наделяются не только привилегиями, но также экономическими преимуществами и политической властью. И в этом кроется одна из причин того, почему сдвиг к более сбалансированной системе ценностей так труден для большинства людей, в особенности для мужчин.

Власть, в смысле господства над другими, — это экстремальная форма самоутверждения. Социальная структура, в которой ее влияние наиболее эффективно, — иерархия. Действительно, наши политические, военные и корпоративные структуры построены по иерархическому принципу, причем мужчины, как правило, занимают высшие уровни, а женщины — низшие. Большинство этих мужчин, а также несколько меньшее число женщин привыкли считать свое место в этой иерархии частью своей индивидуальности, и поэтому сдвиг в сторону другой системы ценностей порождает в них экзистенциальный страх.

Между тем существует другая форма власти, более приемлемая для новой парадигмы, — власть как способность влиять на других. Идеальной структурой для осуществления этого типа власти является не иерархия, а сеть, которая, как мы увидим далее, также служит центральной метафорой экологии¹⁶. Таким образом, сдвиг парадигмы подразумевает и сдвиг в социальной организации — от иерархий к сетям.

Этика

Вопрос о системе ценностей, во всей его сложности и полноте, является основополагающей проблемой глубокой экологии: фактически он определяет ее смысл. Если старая парадигма основана на антропоцентрических (гомо-ориентированных) ценностях, то в основе глубокой экологии лежат эоцентрические (глобо-ориентированные) ценности. Это мировоззрение признает изначальную ценность всякой жизни, помимо человеческого сообщества. Все живые существа являются членами экологических сообществ, объединенных друг с другом сетью взаимозависимостей. Когда такое глубокое экологическое представление становится частью нашего повседневного сознания, возникает радикально новая система этики.

Глубокая экологическая этика насущно необходима именно сегодня, в

особенности в науке, поскольку львиная доля того, чем занимаются ученые, способствует не развитию и сохранению жизни, но ее разрушению. Физики изобретают оружие, грозящее смести жизнь с нашей планеты; химики загрязняют окружающую среду в глобальном масштабе; биологи дают жизнь новым неведомым микроорганизмам, не представляя себе последствий их появления на свет; психологи и другие ученые истязают животных во имя научного прогресса — вся эта непрекращающаяся «деятельность» наводит на мысль о незамедлительном введении эколого-этических законов в современную науку.

Мало кто признает, что система ценностей — не второстепенный фактор в науке и технологии, что она составляет их основу и служит движущей силой. Научная революция XVII века отделила ценности от фактов, и с тех самых пор мы склонны верить, что научные факты не зависят от того, чем мы занимаемся, и, следовательно, не зависят от нашей системы ценностей. В действительности же научные факты возникают из целого конгломерата человеческих представлений, ценностей и поступков — одним словом, из парадигмы, от которой они не могут быть отделены. И хотя многие частные исследования могут явным образом не зависеть от системы ценностей ученого, более широкая парадигма, в контексте которой проводятся эти исследования, никогда не будет свободна от этой системы. А это означает, что ученые несут за свои изыскания не только интеллектуальную, но и моральную ответственность.

В контексте глубокой экологии, понимание того, что система ценностей присуща всей живой природе, зарождается в глубоко экологическом, духовном опыте единства природы и «я». Такое расширение нашего «я» вплоть до отождествления с природой становится основой глубокой экологии. Это ярко выражено у Арне Наэсса:

Поток забот течет естественно, если «я» расширяется и углубляется так, что начинаешь ощущать защиту свободной Природы и постигаешь, что эта защита распространяется на всех нас... Точно так же как мораль не нужна нам, чтобы дышать... вашему «я», если оно объединяется, в широком смысле, с другим существом, не требуются моральные проповеди для проявления заботы... Вы заботитесь о себе, не ощущая морального, принуждающего давления... Если реальность такова, как она ощущается экологическим «я», наше поведение *естественно* и изящно следует строгим правилам этики окружающей среды¹⁷.

Из этого следует, что между экологическим восприятием мира и

соответствующим поведением существует не логическая, но психологическая связь¹⁸. Логика отнюдь не уводит нас от того факта, что мы являемся интегральной частью паутины жизни, в сторону жестких правил, определяющих, как нам следует жить. Тем не менее, если мы обладаем глубоко экологическим осознанием, или опытом, бытия как участия в паутине жизни, тогда мы *будем* (как противоположность, *вынуждены*) заботиться о всей живой природе. Фактически мы и не сможем реагировать по-другому.

Связь между экологией и психологией, выражаемая понятием *экологического «я»*, недавно была исследована несколькими авторами. Специалист по глубокой экологии Джоанна Мэйси пишет *об «озеленении себя»*¹⁹, философ Уорвик Фокс ввел в обиход термин *трансперсональная экология*²⁰, а историк культуры Теодор Розак использует понятие *экопсихологии*²¹ для обозначения глубокой связи между двумя этими сферами, которые до недавнего прошлого были совершенно раздельными.

Сдвиг от физики к наукам о жизни

Называя зарождающееся новое видение реальности *экологическим*, в смысле глубокой экологии, мы еще раз подчеркиваем, что жизнь как таковая находится в самом его центре. Это очень важный момент для науки, поскольку в старой парадигме физика являлась моделью и источником метафор для всех других наук. «Вся философия подобна дереву: корни — это метафизика, ствол — физика, а крона — это все другие науки», — писал Декарт²².

Глубокая экология преодолела эту картезианскую метафору. И хотя сдвиг парадигмы в физике все еще представляет особый интерес, поскольку в современной науке он был первенцем, физика сегодня уже утратила роль науки, обеспечивающей наиболее фундаментальное описание реальности. Тем не менее, это пока еще не общепризнанный факт. Ученые, и не только они одни, часто высказывают старое доброе убеждение, что «если ты хочешь узнать суждение в последней инстанции, обратись к физику», что несомненно служит примером картезианского заблуждения. Сегодня сдвиг парадигмы в науке, на самом глубоком уровне, предполагает сдвиг от физики к наукам о жизни.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 1

¹ Один из самых авторитетных источников — регулярные годовые отчеты State of the World, публикуемые Worldwatch Institute в Вашингтоне, окр. Колумбия. Другие великолепные отчеты можно найти в Hawken(1993) и Gore(1992).

² Brown (1981).

³ См. Capra(1975).

⁴ Kuhn(1962).

⁵ См. Capra(1982).

⁶ Capra(1986).

⁷ См. Devall and Sessions (1985).

⁸ См. Capra and Steindl Rast (1991)

⁹ Arne Naess, цитируется по Devall and Sessions (1985), p. 74.

¹⁰ См. Merchant (1994), Fox (1989)

¹¹ См. Bookchin(1981).

¹² Eisler(1987).

¹³ См. Merchant (1980).

¹⁴ См. Spretnak (1978,1993).

¹⁵ См. Capra (1982), p. 43.

¹⁶ См. ниже, с. 50.

¹⁷ Arne Naess, цитируется по Fox (1990), p. 217.

¹⁸ См. Fox (1990), pp. 246-7.

¹⁹ Масу(1991).

²⁰ Fox (1990).

²¹ Roszak(1992).

²² Цитируется по Capra (1982), p. 55.

ЧАСТЬ II

РАСЦВЕТ СИСТЕМНОГО МЫШЛЕНИЯ

Глава 2

От частей к целому

На протяжении этого столетия переход от механистической к экологической парадигме осуществлялся в различных формах и с разной скоростью во многих областях науки. Переход этот не был простым. Здесь случались и научные революции, и откаты назад, и метаморфозы, подобные качанию маятника. Хаотический маятник, в смысле теории хаоса (на первый взгляд, случайные колебания, которые никогда не повторяются точно и вместе с тем подчиняются сложному, высокоорганизованному паттерну), — вот что, вероятно, могло бы стать наиболее подходящей метафорой нашего времени.

Основной конфликт приходится на взаимоотношение частей и целого. Акцент на части получил название механистического, редукционистского или атомистического подхода, акцент на целое характерен для холистического, организменного или экологического взгляда. В науке XX века холистический подход стал более известен как *системный*, а соответствующий ему образ мысли — г как *системное мышление*. В этой книге я буду использовать термины «экологический» и «системный» как синонимы, приписывая «системному» более техническое, научное значение.

Основные особенности системного мышления сформировались одновременно в нескольких дисциплинах в первой половине этого столетия, в особенности в 20-е годы. Первопроходцами системного мышления стали биологи, которые придерживались взгляда на живой организм как на интегрированное целое. Далее оно обогатилось гештальт-психологией и новой наукой экологией, но наиболее драматические эффекты вызвало в квантовой физике. Поскольку центральная идея новой парадигмы касается природы жизни, мы в первую очередь обратимся к биологии.

Вещество и форма

Конфликт между механицизмом и холизмом несомкнутой темой проходит через всю историю биологии. Это неизбежное следствие древней дихотомии между веществом (материей, структурой, количеством) и формой (моделью, порядком, качеством). Биологическая форма являет собой нечто большее, чем просто форму, чем статическое расположение компонентов в целом. Становление и поддержание формы сопровождается перетеканием материи по живому организму. Здесь есть развитие, здесь происходит эволюция. Таким образом, понимание биологической формы неразрывно связано с пониманием метаболических и эволюционных

процессов.

На заре развития западной философии и науки пифагорейцы отличали *число*, или паттерн, от *вещества*, или материи, рассматривая первое как нечто ограничивающее материю и придающее ей форму. Как говорит об этом Грегори Бэйтсон:

Дискуссия приобрела следующую форму: «Ты спрашиваешь, из чего это сделано — из земли, огня, воды и т.д.?» Или ты спрашиваешь: «По какой модели, по какому *паттерну* это сделано?» Пифагорейцы настаивали на том, чтобы изучать паттерн, а не исследовать вещество².

Аристотель, первый биолог в западной традиции, также проводил различие между материей и формой, но в то же время соединял их через процесс развития³. В отличие от Платона, Аристотель считал, что форме не присуще изолированное существование и что она имманентна материи. Материя тоже не может существовать отдельно от формы. Материя, по Аристотелю, содержит в себе сущностную природу всех вещей, но только как возможность. Посредством формы эта сущность становится реальной, или настоящей. Процесс самореализации сущности в реальных явлениях был назван Аристотелем *энтелехией* («самозавершением»). Это и есть процесс развития, рывок в направлении полной самореализации. Материя и форма — две стороны этого процесса, их разделение возможно лишь через абстракцию.

Аристотель создал формальную систему логики и набор унифицированных понятий, которые он применял к главным дисциплинам своего времени — биологии, физике, метафизике, этике и политике. Его философия и научные взгляды доминировали в западной мысли на протяжении двух тысячелетий. За это время его авторитет стал фактически столь же бесспорным, как и авторитет Церкви.

Картезианский механицизм

В XVI и XVII столетиях средневековое мировоззрение, основанное на аристотелевской философии и христианской теологии, претерпело радикальные изменения. Представление об органической, живой, духовной Вселенной сменилось концепцией мира как машины; мировая машина стала доминирующей метафорой эпохи. Столь радикальные перемены были вызваны новыми открытиями в физике, астрономии и математике. Совокупность этих открытий получила название *научной революции*, и ее принято связывать с именами Коперника, Галилея, Декарта, Бэкона и Ньютона⁴.

Галилео Галилей предал качество научной анафеме, ограничив науку исследованием лишь тех явлений, которые могут быть измерены и исчислены. Это была очень удачная стратегия для новой науки, однако

наша одержимость подсчетами и измерениями обошлась недешево. Как выразительно писал об этом психиатр Р. Д. Лэинг:

Программа Галилео предлагает нам мертвый мир: исчезло все видимое, исчезли звук, вкус, осязание и запах, а вместе с ними пропали эстетическая и этическая чувствительность, система ценностей, качество, душа, сознание, дух. Переживание как таковое изгнано из мира научного внимания. За последние четыре столетия мало что повлияло на наш мир в такой степени, как это удалось дерзкой программе Галилео. Нам пришлось разрушить мир теоретически, прежде чем мы обрели возможность разрушить его практически⁵.

Рене Декарт создал метод аналитического мышления: суть метода состояла в том, чтобы разбить сложный феномен на части и понять поведение целого на основе свойств этих частей. Декарт обосновывал свое Мировоззрение на фундаментальном разделении двух независимых и изолированных миров — разума и материи. Материальная вселенная, включая живые организмы, виделась Декарту машиной, которая в принципе может быть понята полностью посредством анализа ее мельчайших частей.

Концептуальная модель, созданная Галилео и Декартом, — мир как совершенная машина, управляемая строгими математическими законами, — была триумфально завершена Исааком Ньютоном, чья великая система, *ньютоновская механика*, явилась венцом достижений науки семнадцатого столетия. В биологии Уильям Гарвей чрезвычайно удачно применил картезианский механицизм к феномену кровообращения. Воодушевленные успехом Гарвея, физиологи того времени попытались использовать механистический метод для описания других функций организма, в частности пищеварения и обмена веществ. Однако эти попытки окончились печальными провалами, поскольку явления, которые физиологи пытались объяснить, были связаны с химическими процессами, не известными в то время, и не могли быть описаны в механистических терминах. Ситуация значительно изменилась в восемнадцатом веке, когда Антуан Лавуазье, «отец современной химии», показал, что дыхание представляет собой особую форму окисления, и тем самым подтвердил причастность химических процессов к функционированию живых организмов.

В свете новой химической науки упрощенные механистические модели живых организмов, по большей части, были отброшены, однако суть картезианской идеи выжила. Животные остались машинами, хотя было понятно, что они гораздо сложнее, чем механический будильник, так как в них происходят сложные химические процессы. Соответственно,

картезианский механицизм выразился в догме о том, что законы биологии в конечном счете могут быть сведены к законам физики и химии. В это же время нашла свое наиболее сильное и яркое выражение грубо механистическая психология, изложенная в полемическом трактате «Человек-машина» Жюльена де Ламетри; эта работа пережила восемнадцатый век и вызвала огромное количество дискуссий и возражений — некоторые из них дошли даже до наших дней⁶.

Движение романтиков

Первая значительная оппозиция механистической картезианской парадигме сформировалась в романтическом направлении искусства, литературы и философии в конце XVIII и в XIX веке. Уильям Блейк, великий мистический поэт и художник, испытавший сильное влияние английского романтизма, был страстным критиком Ньютона. Он подытожил свою критику в знаменитых строках:

Храни нас Бог

От виденья, единого для всех,

И снов Ньютона.

Немецкие романтические поэты и философы вернулись к аристотелевской традиции, сосредоточившись на органической форме природы. Гете, центральная фигура этого движения, первым использовал термин *морфология* при изучении биологической формы в динамическом, эволюционном контексте. Он восхищался «подвижным порядком» [Bewegliche Ordnung] природы и понимал форму как модель взаимоотношений внутри организованного целого. Эта концепция сегодня оказалась на переднем крае современного системного мышления. «Каждое создание, — писал Гете, — есть не что иное, как смоделированный оттенок [Schatcierung] единого великого гармоничного целого»⁸. Художники-романтики были озабочены главным образом качественным пониманием моделей, поэтому они придавали большое значение объяснению основных свойств жизни посредством визуальных форм. Гете, в частности, считал, что визуальное восприятие — это путь, ведущий к пониманию органической формы⁹.

Понимание органической формы играло важную роль и в философии Иммануила Канта, которого часто называют величайшим философом нового времени. Будучи идеалистом, Кант отделял мир явлений от мира «вещей в себе». Он полагал, что наука может предложить лишь механистические объяснения, однако утверждал при этом, что в сферах, где такие объяснения оказываются несостоятельными, научное знание следует дополнять признанием цели в природе. Важнейшей из таких сфер, по Канту, является понимание жизни¹⁰.

В работе «*Критика практического разума*» Кант рассматривает

природу живых организмов. Он подчеркивает, что организмы, в отличие от машин, представляют собой самовоспроизводящиеся, самоорганизующиеся целостности. В машине, согласно Канту, части существуют только Друг для друга, в смысле поддержки друг друга в рамках функциональной целостности. В организме части существуют также *с помощью друг друга* "Руга, в смысле создания друг друга". «Мы должны рассматривать каждую часть как орган, — писал Кант, — который производит другие части (так что каждая из них взаимно производит другую)... Поэтому [организм] является как организованным, так и самоорганизующимся существом»¹². Эти слова Канта показывают, что он не только первым применил термин *самоорганизация* для определения природы живых организмов, но и использовал его в смысле, замечательным образом близком некоторым современным концепциям¹³.

Романтический взгляд на природу как на «единое великое гармоничное целое» (Гете) побудил некоторых ученых того времени расширить поиск целостности до масштабов всей планеты и посмотреть на Землю как на единое, целое, живое создание. Отношение к Земле как к живому созданию, конечно, имеет древние традиции. Мифические образы Матери-Земли — древнейшие в религиозной истории человечества. Гайя, богиня Земли, почиталась как верховное божество в доэллинической Греции¹⁴. Еще ранее, в период от неолита до бронзового века, сообщества «старой Европы» поклонялись многочисленным богиням как инкарнациям Матери-Земли¹⁵.

Идея Земли как живого одухотворенного существа продолжала цвести пышным цветом вплоть до эпохи Возрождения, пока средневековое мировоззрение не было полностью вытеснено картезианским образом мира как машины. Таким образом, когда ученые восемнадцатого века стали рассматривать Землю как живое существо, они возродили древнюю традицию, пробудили ее после относительно короткого периода спячки.

Относительно недавно идея живой планеты была сформулирована на современном научном языке в виде так называемой *Гайя-гипотезы*. Интересно отметить, что понятия о живой Земле, разработанные учеными восемнадцатого века, содержат некоторые ключевые элементы нашей современной теории¹⁶. Шотландский геолог Джеймс Хаттон установил, что все геологические и биологические процессы взаимосвязаны, и сравнил воды Земли с циркуляторными системами животных. Александр фон Гумбольдт, один из величайших системных мыслителей XVIII—XIX вв., развил эту идею еще дальше. «Привычка смотреть на Землю как на великое целое» привела Гумбольдта к убеждению, что климат является объединяющей глобальной силой, и к признанию совместной эволюции живых организмов, климата и земной коры, что почти полностью соответствует концепциям современной Гайя-гипотезы¹⁷.

В конце XVIII — начале XIX столетия влияние романтического движения было столь значительным, что биологов прежде всего заботила проблема биологической формы, а вопросы материального строения отошли на второй план. В особенности это относилось к великим французским школам сравнительной анатомии, или «морфологии», основанной Жоржем Кювье, который разработал систему зоологической классификации, основанной на подобии структурных связей¹⁸.

Механицизм девятнадцатого столетия

Во второй половине XIX века маятник качнулся назад к механицизму, когда усовершенствование микроскопа привело к многочисленным замечательным открытиям, продвинувшим развитие биологии¹⁹. Девятнадцатое столетие прославилось развитием эволюционных представлений; но в этот же период была сформулирована и теория клетки, зародилась современная эмбриология, расцвела микробиология, были открыты законы наследственности. Эти новые открытия прочно связали биологию с физикой и химией, и ученые возобновили усилия в поисках физико-химических объяснений жизни.

Когда Рудольф Фирхов сформулировал теорию клетки в ее современном виде, фокус внимания биологов сместился от организмов к клеткам. Результаты взаимодействия между молекулярными строительными блоками рассматривались теперь как биологические функции, а не как отражение сложной работы организма в целом. В исследованиях в области микробиологии — новой сфере, которая выявила неожиданное богатство и сложность микроскопических живых организмов, — доминировал гений Луи Пастера, чьи прозорливые догадки и четкие формулировки оказали продолжительное воздействие на химию, биологию и медицину. Пастеру удалось выявить роль бактерий в определенных химических процессах, что заложило основы новой науки биохимии. Он показал также, что существует несомненная связь между микробами (микроорганизмами) и заболеванием.

Открытия Пастера привели к упрощенной «микробной теории болезни», в которой бактерии рассматривались в качестве единственной причины болезни. Эта редукционистская теория была вытеснена альтернативной теорией, которую несколькими годами ранее разработал Клод Бернар, основатель современной экспериментальной медицины. Бернар настаивал на том, что между организмом и окружающей средой существует тесная взаимосвязь. Он первым обратил внимание на то, что каждый организм обладает также и внутренней средой, в которой живут его органы и ткани. Наблюдения Бернара показали, что в здоровом организме эта внутренняя среда остается весьма стабильной, даже если во внешней среде происходят значительные колебания. Его концепция

постоянства внутренней среды предвозвестила важное понятие гомеостаза, выдвинутое Уолтером Кэнноном в 20-е годы.

Новая наука биохимия неуклонно прогрессировала, и это укрепило биологов в убеждении, что все свойства и функции живых организмов в конце концов будут объяснены в рамках химических и физических законов. Наиболее четко эта надежда была выражена Жаком Лебом в его «*Механистической концепции жизни*» — работе, которая имела огромное влияние на биологическое мышление того времени.

Витализм

Триумфальное шествие биологии девятнадцатого столетия — теория клетки, эмбриология и микробиология — возвело механистическую концепцию жизни в ранг непоколебимой догмы в кругу биологов. И все же этот круг уже взращивал внутри себя семена следующей волны оппозиции, известной как школа *организменной биологии, или органицизма*. В то время как клеточная биология достигла гигантского прогресса в понимании структур и функций многих субэлементов клетки, она, по большей части, не проявляла интереса к координирующей деятельности, которая интегрирует эти операции в функционирование клетки как целого.

Ограничения редукционистской модели проявились еще более драматично в проблемах развития и видоизменения клеток. На самых ранних стадиях развития высших организмов число их клеток увеличивается от одной до двух, до четырех и т. д., каждый раз удваиваясь. Поскольку в каждой клетке содержится идентичная генетическая информация, то каким образом они могут специализироваться в разных направлениях, становясь мышечными клетками, кровяными клетками, нервными клетками и т.д. ? Эта основная проблема развития, проявляющаяся в самых различных вариантах во всех областях биологии, явным образом бросает вызов механистическому взгляду на жизнь.

Прежде чем зародился органицизм, многие выдающиеся биологи отдали дань витализму, и в течение долгих лет дискуссии между механицизмом и холизмом ограничивались спорами между механицистами и виталистами²⁰. Ясное понимание виталистической идеи очень полезно, поскольку она находится в радикальном контрасте по отношению к системному взгляду на жизнь, порожденному органицизмом в XX веке.

Как витализм, так и органицизм противостоят сведению биологии лишь к химии и физике. Обе школы утверждают, что, хотя законы физики и химии применимы к организмам, они недостаточны для полного понимания феномена жизни. Поведение живого организма как единого целого не может быть понято на основе изучения его отдельных частей. Как сформулируют это системные теоретики несколько десятилетий

спустя, целое — это нечто большее, чем сумма его частей.

Виталисты и организменные биологи дают совершенно разные ответы на строго поставленный вопрос: в каком смысле целое превышает сумму своих частей? Виталисты утверждают, что некая нематериальная сущность, сила или поле, должна дополнить законы физики и химии, чтобы жизнь смогла быть понята. Организменные биологи заявляют, что дополнительным ингредиентом должно стать понимание *организации* — «организующих связей».

Поскольку эти организующие связи являют собой модели взаимоотношений, присущие физической структуре организма, организменные биологи утверждают, что для понимания жизни нет нужды вводить какую-либо нематериальную сущность. Позже мы увидим, что понятие организации усовершенствовалось и превратилось в концепцию *самоорганизации* в современных теориях живых систем и что понимание модели самоорганизации является ключевым для понимания существенной природы жизни.

Если организменные биологи бросили вызов аналогиям картезианской машины, пытаясь понять биологическую форму в рамках более широкого значения организации, то виталисты фактически не выходили за пределы картезианской парадигмы. Их язык был ограничен теми же образами и метафорами; они просто привнесли туда нефизическую сущность, играющую роль разработчика и руководителя процессов организации, которые не укладываются в механистические объяснения. Таким образом, картезианский раскол между разумом и телом дал жизнь не только механицизму, но и витализму. Когда последователи Декарта вытеснили понятие разума из биологии и стали представлять тело как машину, «дух из машины» (выражение Артура Кестлера²¹) снова появился в виталистических теориях.

Немецкий эмбриолог Ганс Дриш в начале века выступил против механистической биологии, проводя свои уникальные эксперименты над яйцами морского ежа; это закончилось созданием первой теории витализма. Когда Дриш разрушил одну из клеток эмбриона на самой ранней, Двухклеточной стадии, оставшаяся клетка развилась не в половинку морского ежа, но в полноценный организм, размером несколько меньше обычного. Точно так же, полноценные, но более мелкие организмы развивались после разрушения двух или трех клеток в четырехклеточном эмбрионе. Дриш понял, что яйца морского ежа совершают то, что машине не под силу: они регенерируют целое из некоторых отдельных частей.

Чтобы объяснить феномен саморегуляции, Дриш, очевидно, настойчиво искал недостающую модель, или паттерн, организации²². Но вместо того,

чтобы обратиться к понятию паттерна, он постулировал каузальный фактор, в качестве которого выбрал аристотелевскую *энтелехию*. Однако если энтелехия Аристотеля есть процесс самореализации, объединяющий материю и форму, то энтелехия, постулированная Дришем, — это отдельная сущность, которая влияет на физическую систему, но не является ее частью.

Идея витализма была недавно возрождена в более изысканной форме Рупертом Шелдрейком, который постулирует существование нематериальных морфогенетических («генерирующих форму») полей как каузальных посредников развития и поддержания биологической формы²³.

Организменная биология

В начале XX века организменные биологи, противостоя механицизму и витализму, взялись за проблему биологической формы с новым энтузиазмом, развивая и совершенствуя многие из важнейших прозрений Аристотеля, Гете, Канта и Кювье. Некоторые из главных особенностей того, что мы сегодня называем системным мышлением, явились следствием их напряженной работы²⁴.

Росс Харрисон, один из ранних представителей органицизма, исследовал концепцию организации, которая постепенно вытеснила старое понятие функции в психологии. Этот сдвиг от функции к организации знаменует сдвиг от механистического к системному мышлению, поскольку функция, по своей сути, есть понятие механистическое. Харрисон определил конфигурацию (форму) и взаимосвязь как два важных аспекта организации, которые впоследствии были объединены в понятие *паттерна* как конфигурации упорядоченных взаимоотношений.

Биохимик Лоуренс Хендерсон известен тем, что уже в своих ранних работах применял термин *система*, как к живым организмам, так и к социальным сообществам²⁵. Начиная с этого времени, системой принято считать интегрированное целое, чьи существенные особенности формируются через взаимосвязи его частей; *системным мышлением* называют понимание феномена в контексте более обширного целого. Таково, фактически, первоначальное значение слова «система», происходящего от греческого *синхистанай* — «располагать вместе». Понимать вещи системно означает дословно: помещать их в какой-либо контекст, устанавливать природу их взаимосвязей²⁶.

Биолог Джозеф Вуджер утверждал, что организмы могут быть полностью описаны на языке составляющих их химических элементов «плюс организующие связи». Эта формулировка значительно повлияла на Джозефа Нидхэма, который считал, что публикация *«Биологических принципов»* Вуджера в 1936 г. положила конец спорам между механицистами и виталистами²⁷. Сам Нидхэм, чья ранняя работа была

посвящена проблемам биохимии развития, всегда проявлял глубокий интерес к философским и историческим измерениям науки. Он написал множество статей в поддержку механистической парадигмы, но со временем пришел к организменному мировоззрению. «Логический анализ концепции организма, — писал он в 1935 г., — заставляет нас искать организующие связи живой структуры на всех уровнях, высших и низших, грубых и тонких»²⁸. Позже Нидхэм оставил биологию и стал одним из ведущих историков китайской науки, а как таковой — страстным адептом организменного мировоззрения, которое лежит в основе всей китайской мысли.

Вуджер и многие другие исследователи подчеркивали, что одной из ключевых особенностей организации живых организмов выступает ее иерархическая природа. Действительно, выдающимся свойством всякой жизни является тенденция к формированию многоуровневых структур — систем внутри других систем. Каждая из них образует целое по отношению к своим частям, в то же время являясь частью более объемного целого. Так, клетки объединяются, формируя ткани, ткани формируют органы, а органы формируют организмы. Последние, в свою очередь, существуют внутри социальных и экологических систем. Всюду в пределах живого мира мы находим живые системы, вкрапленные в другие живые системы.

Еще на заре развития организменной биологии эти многоуровневые структуры стали называть иерархиями. Однако этот термин может легко ввести в заблуждение, поскольку ассоциируется с человеческими иерархиями; последние представляют достаточно ригидные структуры господства и контроля, что отнюдь не напоминает многоуровневый порядок, присущий природе. Мы увидим дальше, что важное понятие *сети* — паутины жизни — позволяет по-новому взглянуть на так называемые «иерархии» природы.

Ранние системные аналитики очень ясно представляли себе, что существуют различные уровни сложности и что на каждом уровне применимы свои типы законов. Понятие *организованной сложности* стало поистине важнейшей темой системного подхода²⁹. На каждом уровне сложности наблюдаемые явления отличаются свойствами, которых не существует на более низком уровне. Например, понятие температуры, которое является центральным в термодинамике, лишено смысла на уровне индивидуальных атомов, где действуют законы квантовой теории. Подобным же образом, вкус сахара отсутствует в атомах углерода, водорода и кислорода, из которых сахар состоит. В начале 20-х гг. философ К. Д. Бруд ввел термин *внезапные свойства* — для тех свойств, которые проявляются лишь на определенном уровне сложности, но не существуют на более низких уровнях.

Системное мышление

Идеи, выдвинутые организменными биологами в первой половине нашего столетия, способствовали зарождению нового способа мышления — *системного мышления* — опирающегося на связность, взаимоотношения, контекст. Согласно системному взгляду, существенными свойствами организма, или живой системы, являются свойства целого, которыми не обладает ни одна из его частей. Новые свойства возникают из взаимодействий и взаимоотношений между частями. Эти свойства нарушаются, когда система рассекается, физически или теоретически, на изолированные элементы. Хотя мы можем распознать индивидуальные части в любой системе, эти части не изолированы, и природа целого всегда отличается от простой суммы его частей. Системный взгляд на жизнь красиво и исчерпывающе иллюстрируется в работах Пауля Вайсса, который принес системные понятия в науку о жизни из своих прежних исследований в области прикладной техники; Вайссе посвятил всю свою жизнь изучению и пропаганде целостной организменной концепции биологии³⁰.

Возникновение системного мышления стало настоящей революцией в истории западной научной мысли. Убеждение, что в любой сложной системе поведение целого может быть полностью понято на основе свойств его частей, было центральным в картезианской парадигме. Именно знаменитый декартовский метод аналитического мышления составлял суть современной научной мысли. При аналитическом, или редукционистском, подходе сами части можно анализировать дальше не иначе, как только сведя их к еще меньшим частям. Действительно, западная наука развивалась именно таким путем, и на каждой стадии мы имели дело с неким уровнем фундаментальных составляющих, анализировать которые дальше не представлялось возможным.

Величайшим шоком для науки XX века стал тот факт, что систему нельзя понять с помощью анализа. Свойства частей не являются их внутренними свойствами, но могут быть осмыслены лишь в контексте более крупного целого. Таким образом, изменились представления о взаимоотношениях частей и целого. При системном подходе свойства частей могут быть выведены только из организации целого. Соответственно, системное мышление не концентрирует внимание на основных «кирпичиках», но интересуется основными принципами организации. Системное мышление *контекстуально*, что являет собой противоположность аналитическому мышлению. Анализ означает отделение чего-либо, с тем чтобы понять его; системное мышление означает помещение чего-либо в более обширный контекст целого.

Квантовая физика

То, что система есть интегрированное целое, которое нельзя понять посредством анализа, оказалось еще более шокирующим в физике, чем в биологии. Со времен Ньютона физики полагали, что все физические явления могут быть сведены к свойствам тяжелых и твердых материальных частиц. Однако в 20-е годы квантовая теория заставила их принять тот факт, что твердые материальные объекты классической физики на субатомном уровне разлагаются на волноподобные вероятностные паттерны. Более того, эти паттерны представляют не вероятности объектов, а вероятности взаимосвязей. Субатомные частицы бессмысленны как изолированные сущности; они могут быть поняты лишь как взаимосвязи, или корреляции, между различными процессами наблюдения и измерения. Другими словами, субатомные частицы — *не вещи*-, а взаимосвязи между вещами, которые, в свою очередь, служат взаимосвязями между другими вещами, и т. д. В квантовой теории мы никогда не останавливаемся на *вещах*, но всегда имеем дело с взаимосвязями.

Тем самым квантовая физика показывает, что мы не можем разложить мир на независимо существующие элементарные единицы. По мере того как мы сдвигаем фокус нашего внимания от макроскопических объектов к атомам и субатомным частицам, природа не демонстрирует нам никаких изолированных строительных блоков; вместо этого появляется сложная паутина взаимоотношений между различными частями единого целого. Как выразил это Вернер Гейзенберг, один из основателей квантовой теории: «Таким образом, мир оказывается сложной тканью событий, в которой связи различного рода сменяют друг друга, или перекрываются, или объединяются, тем самым определяя текстуру целого»³¹.

Молекулы и атомы — структуры, описываемые квантовой физикой, — состоят из компонентов. Однако эти компоненты, субатомные частицы, не могут быть поняты как изолированные сущности, но должны быть определены через взаимосвязи. Как говорил Генри Стэпп: «Элементарная частица не является независимо существующей, доступной для анализа сущностью. По сути, это совокупность взаимосвязей, которая тянется наружу, к другим вещам»³².

В формализме квантовой теории эти взаимоотношения принято выражать в вероятностных терминах, причем вероятности определяются динамикой всей системы. Если в классической механике свойства и поведение частей определяли соответствующие характеристики целого, то в квантовой механике ситуация изменилась на противоположную: именно целое определяет поведение частей. В 20-е годы ученые в области квантовой физики сражались за тот же концептуальный сдвиг от частей к целому, который породил и школу организменной биологии. И биологам, вероятно, трудно было бы преодолеть картезианский механицизм, если бы

он так эффектно не провалился в физике, которая являла собой триумф картезианской парадигмы на протяжении трех столетий. Гейзенберг усмотрел в сдвиге от частей к целому центральный аспект концептуальной революции, и это произвело на него такое впечатление, что он даже озаглавил свою научную автобиографию «*Der Teil und das Ganze*» («Часть и целое»)³³.

Гештальт-психология

Если первые биологи организменного направления обнаружили проблему органической формы и включились в дискуссию об относительных достоинствах механицизма и витализма с некоторым опозданием, то немецкие психологи вносили свой вклад в этот диалог с самого начала³⁴. В немецком языке органическая форма обозначается словом *Gestalt* (в отличие от *Form*, которое означает неодушевленную форму), и в те дни широко обсуждаемая проблема органической формы была известна как *Gestaltproblem*. В начале века философ Христиан фон Эренфельс впервые использовал термин *Gestalt* для обозначения нередуцируемого перцептуального паттерна, что дало начало школе гештальт-психологии. Эренфельс, характеризуя гештальт, утверждал, что здесь целое превышает сумму своих частей, что позже стало ключевой формулой для системных мыслителей³⁵.

Гештальт-психологи, возглавляемые Максом Вертхаймером и Вольфгангом Кёлером, видели в существовании нередуцируемых целых ключевой аспект восприятия. Живые организмы, как они утверждали, воспринимают вещи не как изолированные элементы, но как интегрированные перцептуальные паттерны — значимые организованные целостности, которые проявляют свойства, отсутствующие в их частях. Понятие паттерна было всегда присуще работам гештальт-психологов; часто в качестве аналогии они приводили музыкальную тему — ее можно сыграть в разных тональностях, но при этом она не потеряет своих существенных особенностей.

Подобно организменным биологам, гештальт-психологи видели свою школу как третий путь, помимо механицизма и витализма. Гештальт-школа внесла значительный вклад в область психологии, особенно в сферу обучения и понимания природы ассоциаций. Несколько десятилетий спустя, в 60-е годы, холистический подход к психологии породил соответствующую школу психотерапии, известную как гештальт-терапия, которая придает огромное значение интеграции индивидуальных переживаний в значимые целостности³⁶.

В Германии 20-х годов, в период Веймарской республики, как организменная биология, так и гештальт-психология являли собой часть более обширного интеллектуального направления, движения протеста

против нарастающей фрагментации и отчуждения человеческой природы. Вся Веймарская культура характеризовалась антимеханистическим мировоззрением, «жаждой целостности»³⁷. Организменная биология, гештальт-психология, экология, а позже и общая теория систем — все это возросло на этом холистическом *Zeitgeist* («духе времени»).

Экология

Если биология столкнулась с нередуцируемой целостностью в организмах, квантовая физика — в атомных явлениях, а гештальт-психология — в восприятии, то экологи обнаружили ее при изучении сообществ животных и растений. Новая наука, экология, вышла из организменной школы биологии в девятнадцатом веке, когда биологи начали изучать сообщества организмов.

Экология — от греческого *oikos* («домашнее хозяйство») — это изучение Домашнего Хозяйства Земли. Более строго — это изучение взаимоотношений, в которые вовлечены все члены Домашнего Хозяйства Земли. Термин был введен в 1866 году немецким биологом Эрнстом Геккелем, который определил его как «науку о связях между организмом и окружающим его внешним миром»³⁸. В 1909 году балтийский биолог и пионер экологии Якоб фон Экскюль впервые использовал выражение *Umwelt* («окружающая среда») ³⁹. В 20-е годы экологи сконцентрировали свое внимание на функциональных взаимоотношениях внутри сообществ животных и растений⁴⁰. В своей новаторской книге «*Экология животных*» Чарльз Элтон ввел понятия пищевых цепей и пищевых циклов, полагая кормовые взаимоотношения внутри биологических сообществ их центральным организующим принципом.

Поскольку язык ранних экологов был весьма близок к языку организменной биологии, не удивительно, что они сравнивали биологические сообщества с организмами. Например, Фредерик Клементе, американский эколог-ботаник и пионер в изучении преемственности [succession], рассматривал сообщества растений как *сверхорганизмы*. Это понятие вызвало оживленные споры, которые не затухали в течение почти десяти лет, пока британский эколог-ботаник А. Дж. Тэнсли не отверг понятие сверхорганизма и не ввел термин *экосистема* для обозначения сообществ животных и растений. Понятие экосистемы — определяемое сегодня как «сообщество организмов и их физического окружения, взаимодействующих как экологическая единица»⁴¹, — сформировало все последующее экологическое мышление и одним своим названием способствовало развитию системного подхода в экологии.

Термин *биосфера* впервые был использован в конце девятнадцатого века австрийским геологом Эдуардом Зюссом [Suess] для описания оболочки жизни, окружающей Землю. Несколько десятилетий спустя

русский геохимик Владимир Вернадский в новаторской книге «*Биосфера*» развил эту концепцию в зрелую теорию⁴². Опираясь на идеи Гете, Гумбольдта и Зюсса, Вернадский рассматривал жизнь как «геологическую силу», которая отчасти создает, отчасти контролирует окружающую среду планеты. Среди ранних теорий живой Земли концепция Вернадского ближе всех подходит к современной *Гайя-теории*, разработанной Джеймсом Лавлоком и Линн Маргулис в 1970-е годы⁴³.

Новая наука экология обогатила зарождающееся системное мышление, введя два новых понятия — *сообщество* и *сеть*. Рассматривая экологическое сообщество как собрание организмов, связанных в функциональное целое их взаимоотношениями, экологи способствовали смещению фокуса от организмов к сообществам, применяя одни и те же понятия к различным системным уровням.

Сегодня мы знаем, что большинство организмов не просто являются членами экологического сообщества, но и сами представляют собой сложные экосистемы, содержащие множество более мелких организмов, которые обладают значительной автономией и все же гармонично интегрированы в функционирование целого. Итак, существует три типа живых систем — организмы, части организмов и сообщества организмов, — каждый из которых представляет интегрированное целое и чьи существенные свойства формируются через взаимодействие и взаимозависимость частей.

За миллиарды лет эволюции многие биологические виды сформировали настолько тесные сообщества, что вся их система является огромным организмом, включающим множество особей⁴⁴. Пчелы и муравьи, например, не могут выжить в изоляции, но в больших количествах они ведут себя почти как клетки сложного организма с коллективным интеллектом и способностями к адаптации, в значительной степени превышающими способности индивидуальных членов. Подобная же тесная координация деятельности, известная нам как симбиоз, наблюдается между разными биологическими видами. И здесь опять результирующая живая система обладает характеристиками отдельных организмов⁴⁵.

С самого зарождения экологии считалось, что экологические сообщества состоят из организмов, связанных между собой по сетевому принципу через кормовые отношения. Эта идея постоянно встречается в работах натуралистов XIX века, и когда в 1920-е годы началось изучение пищевых цепей и пищевых циклов, эти понятия были расширены. До современной концепции пищевых паутин.

Конечно, *паутина жизни* — это древняя идея, к которой на протяжении веков обращались поэты, философы и мистики, чтобы передать свое

ощущение сплетенности и взаимозависимости всех явлений. Одно Из самых красивых выражений этой идеи послужило эпиграфом к нашей книге; оно взято из известной речи, приписываемой вождю Сиэтлу.

По мере того как понятие сети приобретало все большую популярность в биологии, системные мыслители стали использовать сетевые модели на всех системных уровнях, рассматривая организмы как сети клеток, органов и систем органов, подобно тому как экосистемы воспринимаются в виде сетей индивидуальных организмов. Соответственно, потоки материи и энергии сквозь экосистемы трактуются как продолжение внутренних метаболических траекторий организма.

Взгляд на живые системы как на сети помогает по-новому взглянуть на так называемые *иерархии природы*⁴⁶. Поскольку живые системы на всех уровнях представляют собой сети, мы должны рассматривать паутину жизни как живые системы (сети), взаимодействующие по сетевому же принципу с другими системами (сетями). Например, схематически мы можем изобразить экосистему в виде сети с несколькими узлами. Каждый узел представляет собой организм, что означает, что каждый узел, будучи визуально увеличенным, сам окажется сетью. Каждый узел в этой новой сети может представлять орган, который, в свою очередь, при увеличении превратится в сеть, и т. д.

Другими словами, паутина жизни состоит из сетей внутри сетей. На каждом уровне, после достаточного увеличения, узлы сети оказываются более мелкими сетями. Мы стараемся строить эти системы, вкрапленные в более крупные системы, по иерархическому принципу, помещая большие системы над меньшими на манер пирамиды. Однако это только человеческая проекция. В природе не существует «над» и «под», не существует иерархий. Существуют лишь сети, вложенные в другие сети.

В последние десятилетия сетевой подход приобретает все большую значимость в экологии. Как сказал об этом эколог Бернар Паттен в своей заключительной речи на недавней конференции по экологическим сетям: «Экология — это именно сети... Полностью понять экосистемы — значит понять сети»⁴⁷. Действительно, во второй половине столетия концепция сети была определяющей в развитии научного понимания не только экосистем, но и самой природы жизни.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 1

1. См. ниже, с. #132-133.

2. Bateson(1972), p. 449.

3. См. Windelband (1901), pp. 139ff. 4. См. Сарга(1982), p. 53.

5. R.D.Laing, цитируемый по Сарга (1988), p. 133.

6. См. Сарга (1982), pp. 107-8.

7. Blake (1802).

8. См. Сарга (1983), p. 6.

9. См. Haraway (1976), pp. 40-42.

10. См. Windelband (1901), p. 565.

11. См. Webster и Goodwin (1982).

12. Kant (1790, ed. 1987), p. 253.

13. См. ниже, с. 100.

14. См. Spretnak (1981), pp. 30ff.

15. См. Gimbutas(1982).

16. См. ниже, с. 102 и далее.

17. См. Sachs (1995).

18. См. Webster и Goodwin (1982).

19. См. Сарга (1982), pp. 108ff.

20. См. Haraway (1976), pp. 22ff.

21. Coestler(1967).

22. См. Driesch (1908), pp. 76ff.

23. Sheldrake (1981).

24. См. Haraway (1976), pp. 33ff.

25. См. Lilienfeld (1978), p. 14.

26. Я благодарен Хайнцу фон Форстеру за его замечание.

27. См. Haraway (1976), pp. 131, 194.

28. Цитируется там же, p. 139.

29. См. Checkland (1981), p. 78.

30. См. Haraway (1976), pp. 147ff.

31. Цитируется по Сарга (1975), p. 264.

32. Цитируется там же, p. 139.

33. К сожалению, британские и американские издатели Гейзенберга не осознали важности этого заглавия и поменяли его на «*Physics and Beyond*» («Физика и то, что за ее пределами»); см. Heisenberg (1971).

34. См. Lilienfeld (1978), pp. 227ff.

35. Christian von Ehrenfels, «*Über Gestaltqualitäten*», 1890; перепечатано в

Weinhandl(1960).

36.См. Capra (1982), p. 427.

37.См. Heims (1991), p. 209.

38.Ernst Haeckel, цитируется по Maren-Grisebach (1982), p. 30.

39.Uexkull(1909).

40.См. Ricklefs (1990), pp. 174ff.

41.См. Lincoln etal. (1982).

42.Vernadsky (1926), см. также Marhulis and Sagan (1995), pp. 44ff.

43.См. ниже с. 117 и далее.

44.См. Thomas (1975), pp. 26ff, 102ff.

45.Там же.

46.См. Burns etal. (1991).

47.Patten (1991).

Глава 3

ТЕОРИИ СИСТЕМ

К 30-м годам XX века в организменной биологии, гештальт-психологии и экологии были сформулированы ключевые критерии системного мышления. Во всех этих областях изучение живых систем — организмов, частей организмов и сообществ организмов — привело ученых к одному и тому же типу мышления, в основе которого лежат понятия связности, взаимоотношений и контекста. Этот новый тип мышления был поддержан и революционными открытиями в квантовой физике — в мире атомов и субатомных частиц.

Критерии системного мышления

Сейчас, очевидно, следует подытожить ключевые характеристики системного мышления. Первый и наиболее общий критерий заключается в переходе от частей к целому. Живые системы представляют собой интегрированные целостности, чьи свойства не могут быть сведены к свойствам их более мелких частей. Их существенные, или *системные*, свойства — это свойства целого, которыми не обладает ни одна из частей. Новые свойства появляются из *организующих отношений* между частями, т. е. из конфигурации упорядоченных взаимоотношений, характерной для конкретного класса организмов или систем. Системные свойства нарушаются, когда система рассекается на изолированные элементы.

Другим ключевым критерием системного мышления служит способность перемещать фокус внимания с одного уровня системы на другой. В пределах живого мира мы находим системы, включенные в другие системы, и, применяя одни и те же понятия к различным системным Уровням — например, понятие стресса к организму, городу или экономике, — мы нередко делаем важные открытия. С другой стороны, мы понимаем, что, вообще говоря, различные системные уровни отличаются уровнями сложности. На каждом уровне наблюдаемые явления отличаются свойствами, которых нет на более низких уровнях. Системные свойства конкретного уровня называются «внезапными свойствами», поскольку они возникают именно на этом определенном уровне.

При переходе от механистического мышления к мышлению системному взаимоотношения между частями и целым приобретают противоположный характер. Картезианская наука полагала, что в любой сложной системе поведение целого может быть выведено из свойств его частей. Системная же наука показывает, что живые системы нельзя понять посредством анализа. Свойства частей — не внутренне присущие им свойства: они могут быть поняты только в контексте более крупного целого. Таким образом, системное мышление — это *контекстуальное* мышление; и

поскольку объяснение вещей в их контексте означает объяснение на языке окружающей среды, то можно сказать также, что все системное мышление — это философия окружающей среды.

В конечном счете — и это наиболее драматично показала квантовая физика — частей вообще нет. То, что мы называем частью, — это всего лишь паттерн в неделимой паутине взаимоотношений. Следовательно, переход от частей к целому можно также рассматривать как переход от объектов к взаимоотношениям. В некотором смысле это переход «фигура — фон». Согласно механистическому мировоззрению, мир есть собрание объектов. Они, конечно, взаимодействуют друг с другом, и, следовательно, между ними существуют взаимоотношения. Однако взаимоотношения здесь вторичны, как это схематически изображено на рис. 3-1 А. Мысля системно, мы понимаем, что сами объекты являются сетями взаимоотношений, включенными в более обширные сети. Для системного мыслителя первичны взаимоотношения. Границы различных паттернов («объектов») вторичны, как это показано — опять-таки, очень упрощенно — на рис. 3-1Б.

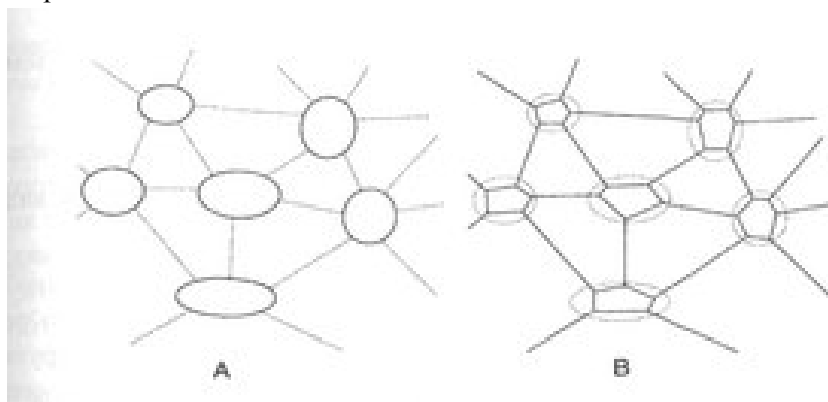


Рис. 3-1. Переход «фигура — фон»: от объектов к взаимоотношениям

Представление живого мира в виде сети взаимоотношений означает, что мышление категориями сетей (более элегантно по-немецки: *vernetztes Denken*) стало еще одной ключевой характеристикой системного мышления. «Сетевое мышление» изменило не только наш взгляд на природу, но и наш способ описания научного знания. На протяжении нескольких веков западные ученые и философы использовали применительно к знанию метафору здания, с вытекающими отсюда многочисленными архитектурными метафорами¹. Мы говорим о *фундаментальных* законах, *фундаментальных* принципах, об основных *строительных блоках* или *кирпичиках*, мы говорим, что *здание* науки должно строиться на надежном *фундаменте*. Когда происходили

значительные научные революции, это воспринималось так, словно сдвигаются основания науки, весь ее фундамент. Так, Декарт писал в своем знаменитом *«Рассуждении о методе»*:

До тех пор пока [науки] заимствуют свои принципы у философии, я считаю, что ничего прочного не может быть построено на таком неустойчивом фундаменте².

Триста лет спустя Гейзенберг писал в *«Физике и философии»*, что фундамент классической физики, то есть все сооружение, воздвигнутое Декартом, рушится:

Бурную реакцию на последние достижения новейшей физики можно понять, только когда осознаешь, что здесь начинают рушиться сами основы физики и это вызывает такое ощущение, как будто земля уходит из-под ног науки³.

Эйнштейн в своей автобиографии описывал подобные чувства:

Было такое ощущение, словно земля ушла из-под ног и нигде не видно тверди, на которой можно что-то построить⁴.

В новом системном мышлении метафора здания (по отношению к знанию) сменяется метафорой сети. Поскольку мы воспринимаем реальность как сеть взаимоотношений, то и наши описания формируют взаимосвязанную сеть понятий и моделей, в которой отсутствуют основы. Для большинства ученых взгляд на знание как на сеть — без прочных основ — весьма неудобен, и сегодня отнюдь нельзя сказать, что он широко распространен и принят. Но, по мере того как сетевой подход будет распространяться в научных кругах, идея знания как сети несомненно будет находить все больше сторонников.

Представление о научном знании как о сети понятий и моделей, в которой ни одна часть не более фундаментальна, чем другая, было сформулировано в 1970-е годы физиком Джеффри Чу в виде так называемой *бутстрап-теории*⁵. Философия бутстрапа не только отвергает идею фундаментальных кирпичиков материи, но вообще не принимает никаких фундаментальных сущностей — ни фундаментальных констант, ни фундаментальных законов или уравнений. Материальная вселенная рассматривается как динамическая паутина взаимосвязанных событий. Ни одно свойство любой части этой паутины не является фундаментальным; все они вытекают из свойств других частей, и общая согласованность их взаимосвязей определяет структуру всей паутины.

Применительно к науке в целом этот подход означает, что физика не может более рассматриваться как самый фундаментальный уровень науки. Поскольку в сети отсутствуют твердые основы, то явления, описанные физикой, не более фундаментальны, чем, скажем, описанные биологией или психологией. Различные явления могут принадлежать к различным

системным уровням, но ни один из этих уровней не фундаментальнее остальных.

Еще одно важное следствие взгляда на реальность как на неразделимую сеть взаимоотношений касается традиционного понятия научной объективности. В картезианской парадигме полагается, что научные описания объективны — в том смысле, что они независимы от наблюдателя и процесса познания. Новая парадигма подразумевает, что эпистемология — описание процесса познания — должна быть явным образом включена в описание природных феноменов.

Признание этого пришло в науку с Вернером Гейзенбергом, и оно тесно связано с видением физической реальности как паутины взаимоотношений. Если мы представим себе сеть, изображенную на рис. 3-1 В, как нечто гораздо более сложное — например, что-то вроде чернильной кляксы в тесте Роршаха, — мы легко поймем, что изолировать паттерн в этой сложной сети, очерчивая его границы и возводя его в ранг «объекта», — занятие достаточно произвольное.

Однако именно это происходит, когда мы говорим об объектах в окружающей нас среде. Например, когда мы видим сеть взаимоотношений между листьями, ветвями и стволом, мы называем ее «деревом». Рисуя дерево, никто обычно не изображает его корни; но корни дерева, как правило, не менее объемны, чем те части, которые мы видим. Более того, в лесу корни всех деревьев взаимосвязаны и образуют плотную подземную сеть, в которой отсутствуют четкие границы между отдельными деревьями.

Другими словами, то, что мы называем деревом, зависит от нашего восприятия. Оно зависит, говоря научным языком, от наших методов наблюдения и измерения. Как говорит Гейзенберг: «То, что мы наблюдаем, не есть природа как таковая, но природа в свете наших вопросов»⁶. Таким образом, системное мышление включает переход от объективной к *эпистемической* науке; к структуре, в которой эпистемология — «способ постановки вопросов» — становится составной частью научных теорий.

Все критерии системного мышления, описанные в этом кратком резюме, взаимосвязаны. Природа рассматривается как взаимосвязанная паутина отношений, в которой идентификация определенных паттернов как «объектов» зависит от наблюдателя и процесса познания. Эта паутина взаимоотношений описывается на языке соответствующей сети понятий и моделей, ни одна из которых не является более фундаментальной, чем остальные.

В связи с этим новым подходом к науке сразу же возникает важный вопрос. Если все связано со всем, то как можно надеяться понять хоть что-

нибудь? Поскольку все природные явления в конечном счете взаимосвязаны, то для того, чтобы объяснить любое из них, нам придется понять и все остальные, что очевидно невозможно.

Превратить системный подход в науку позволяет открытие приблизительного знания. Прозрение это критично для всей современной науки. Старая парадигма основана на картезианской вере в несомненность научного знания. В новой парадигме признается, что все научные понятия и теории ограничены и приблизительны. Наука никогда не сможет обеспечить полного и окончательного понимания.

Это легко проиллюстрировать простым экспериментом, который часто демонстрируют на вводных курсах по физике. Профессор роняет предмет с определенной высоты и показывает студентам с помощью простой формулы из ньютоновской физики, как вычислить время, которое потребуется, чтобы предмет достиг земли. Как и большая часть ньютоновской физики, это вычисление пренебрегает сопротивлением воздуха и, таким образом, не будет абсолютно точным. Действительно, если брошенным предметом оказалось бы перо, эксперимент просто провалился бы.

Профессор может удовлетвориться этим *первым приближением*., но может и шагнуть немного дальше — принять во внимание сопротивление воздуха, добавив в формулу простую переменную. Результат — второе приближение — будет более точным, но не абсолютно, потому что сопротивление воздуха зависит от температуры и атмосферного давления. Если же профессор крайне честолюбив, он может вывести в качестве третьего приближения гораздо более сложную формулу, которая учтет все эти переменные.

Тем не менее сопротивление воздуха зависит не только от температуры и давления воздуха, но также и от конвекции воздуха, т. е. объемной циркуляции частиц воздуха в пределах комнаты. Студенты могут заметить, что конвекция воздуха вызывается, помимо открытого окна, их собственными паттернами дыхания; и тут профессору, очевидно, придется остановить процесс дальнейшего приближения.

Этот простой пример показывает, что падение предмета множеством нитей связано с окружающей его средой — и, в конечном итоге, с остальной вселенной. Сколько бы связей мы ни приняли во внимание в научном описании феномена, каким-то их количеством нам неизбежно придется пожертвовать. Поэтому ученые никогда не имеют дела с истиной в смысле точного соответствия между описанием и описываемым объектом. В науке мы всегда ограничиваемся приблизительными описаниями реальности. Кто-то будет разочарован этим, но для системных мыслителей сам факт, что мы можем получить приблизительные знания о

бесконечной паутине взаимосвязанных паттернов, служит источником доверия и силы. Об этом красиво сказал Луи Пастер:

Наука движется вперед через предварительные ответы на ряд все более и более тонких вопросов, которые все глубже и глубже проникают в сущность природных явлений⁷.

Процессуальное мышление

Все системные понятия, которые мы обсуждали до сих пор, можно рассматривать как различные аспекты одной важнейшей паутины системного мышления, которую мы могли бы назвать контекстуальным мышлением. Есть еще одна паутина не меньшей важности, возникшая немного позже в науке двадцатого века. Эта вторая паутина — процессуальное мышление. В механистических рамках картезианской науки существуют фундаментальные структуры, а также силы и механизмы, через которые они взаимодействуют, запуская таким образом процессы. В системной науке каждая структура рассматривается как проявление процесса, лежащего в ее основе. Системное мышление — это всегда процессуальное мышление.

В ходе развития системного мышления в первой половине столетия процессуальный аспект был впервые выделен австрийским биологом Людвигом фон Берталанфи в конце 30-х годов и позже исследован в кибернетике в 40-е годы. Когда кибернетики превратили петли обратной связи и другие динамические паттерны в центральный объект научного исследования, экологи приступили к изучению циклических потоков материи и энергии через экосистемы. Например, в книге Юджина Одума «*Основы экологии*», оказавшей значительное влияние на целое поколение экологов, экосистемы представлены в виде диаграмм простых потоков⁸.

Конечно, процессуальное мышление, как и контекстуальное, тоже имело своих провозвестников в античной Греции. Еще на заре западной науки прозвучал знаменитый афоризм Гераклита: «Все течет». В 20-е годы английский математик и философ Альфред Норт Уайтхед сформулировал философскую систему, строго ориентированную на процессы⁹. В тот же период времени психолог Уолтер Кэннон, взяв за основу принцип постоянства *внутренней среды* организма, выдвинутый Клодом Бернаром, развил его в концепцию гомеостаза — саморегулирующего механизма, который позволяет организмам поддерживать себя в состоянии динамического баланса, в то время как их переменные колеблются в допустимых пределах¹⁰.

Тем временем подробные экспериментальные исследования клеток показали, что метаболизм живой клетки сочетает порядок и деятельность таким способом, который не может быть описан механистической наукой. Здесь происходят тысячи химических реакций, причем все они протекают

одновременно, трансформируя питательные вещества клетки, синтезируя ее основные структуры и устраняя отбросы. Обмен веществ — это продолжительная, сложная и высокоорганизованная деятельность.

Процессуальная философия Уайтхеда, концепция гомеостаза Кэннона и экспериментальные работы в области метаболизма — все это оказало сильное влияние на Людвиг фон Берталанфи и привело его к созданию *теории открытых систем*. Позже, в 40-е годы, Берталанфи расширил свою концепцию и попытался объединить различные понятия системного мышления и организменной биологии в формальную теорию живых систем.

Тектология

Считается, что Людвиг фон Берталанфи первым предложил общую теорию, описывающую принципы организации живых систем. Однако еще лет за 20—30 до того, как он опубликовал первые работы по своей *общей теории систем*, русский медик-исследователь, философ и экономист Александр Богданов разработал столь же утонченную и всеобъемлющую системную теорию, которая, к сожалению, практически неизвестна за пределами России".

Богданов назвал свою теорию *тектологией* (от греческого *tekton* — «строитель»), что можно истолковать как «наука о структурах». Основная задача Богданова заключалась в том, чтобы прояснить и обобщить принципы организации всех живых и неживых структур:

Тектология должна прояснить режимы организации, существование которых наблюдается в природе и человеческой деятельности; затем она должна обобщить и систематизировать эти режимы; далее она должна объяснить их, то есть предложить абстрактные схемы их тенденций и законов... Тектология имеет дело с организующим опытом не в той или иной специальной области, но во всех этих областях вместе. Другими словами, тектология охватывает предметную сферу всех остальных наук¹².

Тектология стала первой в истории науки попыткой дать систематическую формулировку принципов организации, действующих в живых и неживых системах¹³. Она предвосхитила концептуальную структуру общей теории систем Людвиг фон Берталанфи. Она содержала также несколько важных идей, которые были сформулированы четыре десятилетия спустя Норбертом Винером и Россом Эшби на ином языке — как ключевые принципы кибернетики¹⁴.

Задача Богданова состояла в том, чтобы сформулировать *всеобщую науку организации*. Он определял организационную форму как «совокупность связей среди системных элементов», что фактически идентично нашему современному определению паттерна организации¹⁵.

Используя термины «комплекс» и «система» как синонимы, Богданов различал три типа систем: организованные комплексы, где целое превышает сумму своих частей; неорганизованные комплексы, где целое меньше суммы своих частей; и нейтральные комплексы, где организующая и дезорганизующая деятельность нейтрализуют друг друга.

Стабильность и развитие всех систем, по Богданову, могут быть поняты в контексте двух базовых организационных механизмов: формирования и регулирования. Изучая обе формы организационной динамики и иллюстрируя их многочисленными примерами из природных и социальных систем, Богданов исследует ряд идей, которые оказались ключевыми не только в организменной биологии, но и в кибернетике.

Динамика формирования состоит в соединении комплексов через различного рода связи, которые Богданов очень подробно анализирует. Он подчеркивает, в частности, что конфликт между кризисом и трансформацией является центральным для формирования сложных систем. Предвосхищая работы Ильи Пригожина¹⁶, Богданов показывает, что организационный кризис проявляется как нарушение существующего системного баланса и в то же время представляет организационный переход на новую стадию баланса. Определяя различные категории кризисов, Богданов предугадывает даже концепцию катастроф, разработанную французским математиком Рене Томом и составляющую важнейший компонент зарождающейся науки — математики сложных систем¹⁷.

Как и Берталанфи, Богданов признавал, что живые системы — это открытые системы, функционирующие вдали от состояния равновесия; он тщательно изучал протекающие в них процессы регулирования и саморегулирования. Система, которая не нуждается во внешней регуляции, поскольку регулирует себя сама, на языке Богданова называется *бирегулятором*. Используя пример парового двигателя для иллюстрации саморегулирования — как это будут делать кибернетики несколько десятилетий спустя, — Богданов, по сути, описал механизм, определенный Норбертом Винером как *обратная связь* и ставший центральным понятием кибернетики¹⁸.

Богданов не пытался формулировать свои идеи в математической форме, но он действительно предвидел будущее развитие абстрактного *тектологического символизма* — нового типа математики для анализа открытых им паттернов организации. Полвека спустя такая новая математика действительно появилась¹⁹.

Три тома новаторской книги Богданова «Тектология» издавались на русском языке в период с 1912 по 1917. Широко обсуждавшееся немецкое издание вышло в 1928 году. Тем не менее на Западе очень мало известно о

первой версии общей теории систем и о предтече кибернетики. Даже в «Общей теории систем» Людвиг фон Берталанфи, опубликованной в 1968 году и содержащей раздел по истории теории систем, не содержится ни одной ссылки на Богданова. Трудно понять, каким образом Берталанфи, высокообразованный человек, издававший все свои оригинальные труды на немецком, мог упустить работу Богданова²⁰.

Почти никто из современников не понимал Богданова, поскольку он значительно опередил свое время. По словам советского ученого А. Л. Тахтаджяна, «Идея общей теории организации, чуждая своей универсальностью научному мышлению современников, была в полной мере понята лишь горсткой людей и поэтому не получила распространения»²¹.

Марксистские философы того времени были настроены враждебно к идеям Богданова, поскольку почувствовали в тектологии новую философскую систему, призванную сменить марксизм, хотя Богданов постоянно протестовал против того, чтобы универсальную науку организации путали с философией. Ленин беспощадно громил Богданова как философа, и впоследствии публикация его работ была запрещена в Советском Союзе почти на полвека. В последнее время, однако, в свете горбачевской перестройки, работы Богданова стали привлекать пристальное внимание русских ученых и философов. Таким образом, можно надеяться, что новаторская деятельность Богданова скоро станет известной и за пределами России.

Общая теория систем

До 1940-х годов термины «система» и «системное мышление» использовались лишь некоторыми учеными, но именно концепция открытых систем Берталанфи и общая теория систем возвели системное мышление в ранг главного научного направления²². Благодаря последовавшей энергичной поддержке со стороны кибернетиков, понятия системного мышления и теории систем стали неотъемлемой частью общепринятого научного языка и привели к многочисленным новым технологиям и приложениям — системотехнике, системному анализу, системной динамике и т. д.²³.

Людвиг фон Берталанфи начал свою карьеру как биолог в Вене в 1920-е годы. Вскоре он присоединился к группе ученых и философов, известных в мире как Венский Круг, и с самого начала его работы приобрели широкую философскую направленность²⁴. Как и другие сторонники организменной биологии, он был твердо уверен в том, что биологические феномены требуют новых типов мышления, выходящих за рамки традиционных методов естественных наук. Он выступал за замену механистических основ науки холистическим видением:

Общая теория систем — это общая наука о *целостности*, до сих пор считавшаяся смутной, расплывчатой, полуметафизической концепцией. В своей совершенной форме она должна представлять математическую дисциплину, по сути чисто формальную, но применимую к различным эмпирическим наукам. Для наук, имеющих дело с *организованными целыми*, она бы могла иметь такое же значение, какое имеет теория вероятности для наук, занимающихся *случайными событиями*²⁵.

Несмотря на столь яркое видение будущей формальной, математической теории, Берталанфи пытался укрепить свою общую теорию систем на устойчивых биологических основах. Он возражал против доминирующего положения физики в сфере современной науки и подчеркнул принципиальное различие между физическими и биологическими системами.

Идя к этой цели, Берталанфи четко выделил дилемму, которая озадачивала ученых еще в девятнадцатом столетии, когда в научном мышлении только зародилась новаторская идея эволюции. Если ньютоновская механика была наукой сил и траекторий, то эволюционное мышление — мышление, основанное на переменах, росте и развитии, — требовало новой науки о сложных системах²⁶. Первой формулировкой этой новой науки стала классическая термодинамика с ее знаменитым *вторым законом* — законом рассеяния энергии²⁷. Согласно второму закону термодинамики, впервые сформулированному французским физиком Сади Карно в рамках технологии тепловых двигателей, в физических процессах существует тенденция движения от порядка к беспорядку. Любая изолированная, или *закрытая*, система будет спонтанно развиваться в направлении постоянно нарастающего беспорядка.

Для того чтобы выразить это *направление эволюции* физических систем в точной математической форме, физики ввели новую величину, назвав ее *энтропией*^{21*}. Согласно второму закону, энтропия закрытой физической системы постоянно возрастает, а поскольку эта эволюция сопровождается увеличением беспорядка, то именно энтропию можно рассматривать как меру беспорядка.

Вместе с понятием энтропии и формулировкой второго закона термодинамика ввела в научный обиход идею необратимых процессов — понятие «стрелы времени». Согласно второму закону, некоторая часть механической энергии всегда рассеивается в виде тепла и не может быть полностью восстановлена. Таким образом, вся мировая машина постепенно замедляет ход и в конце концов должна полностью остановиться.

Эта зловещая картина космической эволюции явила разительный

контраст эволюционному мышлению биологов XIX века, которые видели, как живая вселенная развивается от беспорядка к порядку, к состояниям, характеризующимся нарастающей сложностью. В конце XIX столетия ньютоновская механика, наука о бесконечных и обратимых траекториях, была дополнена двумя диаметрально противоположными взглядами на эволюционные перемены — видением, с одной стороны, живого мира, который разворачивается в сторону нарастания порядка и сложности, а с другой — изношенного двигателя, угасающего мира с неуклонно нарастающим беспорядком. Кто же прав, Дарвин или Карно?

Людвиг фон Берталанфи не мог разрешить эту дилемму, но он сделал первый существенный шаг, признав, что живые организмы являются открытыми системами, которые не могут быть описаны в рамках классической термодинамики. Он назвал такие системы «открытыми», поскольку, чтобы поддерживать свою жизнь, им приходится подпитывать себя через непрерывный поток материи и энергии из окружающей среды:

Организм — это не статическая система, закрытая для внешнего окружения и всегда содержащая идентичные компоненты; это открытая система в (квази)устойчивом состоянии: материал непрерывно поступает в нее из окружающей среды и в окружающую среду уходит²⁹.

В отличие от закрытых систем, находящихся в состоянии теплового баланса, открытые системы далеки от равновесия и поддерживают себя в «устойчивом состоянии», которое характеризуется непрерывным потоком и изменениями. Для описания этого состояния динамического равновесия Берталанфи применил немецкое выражение *Fliessgleichgewicht* («текущее равновесие»). Он отчетливо представлял себе, что классическая термодинамика, имеющая дело с закрытыми системами, которые находятся в точке равновесия или рядом с ней, непригодна для описания открытых систем в устойчивых состояниях, далеких от равновесия.

В открытых системах, рассуждал Берталанфи, энтропия (или беспорядок) может снижаться, и второй закон термодинамики здесь неприменим. Он утверждал, что классическая наука должна быть дополнена новой термодинамикой открытых систем. Однако в 1940-е годы математический инструментарий, требуемый для такого расширения, не был доступен Берталанфи. Формулировку новой термодинамики для открытых систем пришлось ждать до 1970-х. Это было великое открытие Ильи Пригожина: он использовал новую математику для переоценки второго закона, радикально переосмыслив традиционные научные взгляды на порядок и беспорядок, что позволило ему недвусмысленно разрешить конфликт двух противоположных взглядов на эволюцию, зародившихся в девятнадцатом веке³⁰.

Берталанфи удачно определил сущность устойчивого состояния как

процесс метаболизма, что привело его к постулированию саморегуляции как еще одного ключевого свойства открытых систем. Эта идея была доведена до совершенства Ильей Пригожиным тридцать лет спустя в виде теории самоорганизации *диссипативных структура*.

Видение Людвигом фон Берталанфи «общей науки целостности» было основано на его наблюдении того, что системные понятия и принципы могут быть применены в разнообразных областях исследований. «Параллелизм общих понятий или даже специальных законов в различных областях, — пояснял он, — является следствием того факта, что они касаются *систем* и что определенные общие принципы применимы к системам любой природы»³². Поскольку живые системы перекрывают широчайший диапазон явлений, включая индивидуальные организмы, их части, социальные системы и экосистемы, Берталанфи полагал, что общая теория систем могла бы обеспечить идеальную концептуальную структуру для объединения различных научных дисциплин, которые страдают изолированностью и фрагментарностью:

Общая теория систем должна стать... важным средством контроля и поощрения при переносе принципов из одной области науки в другую. Тогда отпадет необходимость повторно или троекратно открывать один и тот же принцип в различных изолированных друг от друга сферах. В то же время, сформулировав точные критерии, общая теория систем будет оберегать науку от бесполезных, поверхностных аналогий³³.

Берталанфи так и не увидел свою концепцию реализованной, и, возможно, общая наука о целостности, как он ее себе представлял, никогда не будет сформулирована. Тем не менее уже два десятилетия после его смерти (1972 г.) развивается системная концепция жизни, разума и сознания, которая выходит за рамки обычных дисциплин и действительно обещает объединить различные ранее изолированные области исследований. И хотя эта новая концепция жизни скорее исходит из кибернетики, чем из общей теории систем, она безусловно многим обязана тем понятиям и методологии, которыми обогатил науку Людвиг фон Берталанфи.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 3

1. Я обязан этим открытием моему брату, Бернту Капре, архитектору по образованию.

2. Цитируется по Сарга (1988), p. 66.

3. Цитируется там же.

4. Цитируется там же.

5. См. там же, pp. 50ff.

6. Цитируется по Сарга (1975), p. 126.

7. Цитируется по Сарга (1982), p. 101.

8. Odum(1953).

9. Whitehead(1929).

10. Cannon (1932).

11. Я благодарен Владимиру Майкову и его коллегам из Российской Академии Наук за то, что они ознакомили меня с работами Богданова.

12. Цитируется по Gorelik (1975).

13. Более подробное описание тектологии см. в Gorelik (1975).

14. См. ниже, с. 69 и далее.

15. См. ниже, с. 176.

16. См. ниже, с. 103 и далее.

17. См. ниже, с. 152.

18. См. ниже, с. 73 и далее.

19. См. ниже, с. 131 и далее.

20. См. Matlessich (1983— 84).

21. Цитируется по Gorelik (1975).

22. Первое обсуждение открытых систем, опубликованное на немецком языке, см. в Bertalanffy (1940); его первое эссе по открытым системам на английском языке см. в Bertalanffy (1950), перепечатано в Emery (1969).

23. См. ниже, с. 93 и далее.

24. См. Davidson (1983); краткий обзор работ Берталанфи можно найти также

Lilienfeld (1978), pp. 16-26.

25. Bertalanffy (1968), p. 37.

26. См. Сарга (1982), pp. 72ff.

27. *Первый закон термодинамики* является законом сохранения энергии.

28. Этот термин представляет собой комбинацию *энергии* и *тропоса* — греческого слова, обозначающего трансформацию, или эволюцию.

29. Bertalanffy (1968), p. 121.

- 30.См. ниже, с. 203 и далее.
- 31.См. ниже, с. 103 и далее.
- 32.См. Bertalanffi (1968), p. 84.
- 33.Там же, pp. 80-81.

Глава 4

ЛОГИКА РАЗУМА

В то время как Людвиг фон Берталанфи трудился над своей общей теорией систем, попытки разработать самоуправляющиеся и саморегулирующиеся машины привели к появлению совершенно нового направления исследований, что значительно повлияло на дальнейшее развитие системного взгляда на жизнь. Возникшая из различных дисциплин, новая наука возвестила единый подход к проблемам связи и управления и включала целый комплекс новых идей, которые вдохновили Норберта Винера на изобретение для нее специального названия — *кибернетика*. Это слово происходит от греческого *kybemetes* («кормчий»), и Винер определил кибернетику как науку об «управлении и связи в животных и машинах».

Кибернетика

Вскоре кибернетика стала мощным интеллектуальным направлением, которое развивалось независимо от организменной биологии и общей теории систем. Кибернетики не были ни биологами, ни экологами: они были математиками, нейробиологами, исследователями социальных явлений, инженерами. Они интересовались другим уровнем описания, концентрируясь на паттернах связи, в особенности в замкнутых цепях и «етах». Их исследования привели к появлению понятий обратной связи, саморегуляции и, несколько позже, самоорганизации.

Внимание к паттернам организации, естественно присущее организменной биологии и гештальт-психологии, теперь стало явным центром Интересов кибернетики. Винер, в частности, осознал, что новые понятия *сообщения, управления и обратной связи*, отнесенные к паттернам организации — т. е. нематериальным сущностям, — исключительно важны для всей системы научного описания жизни. Позже Винер расширил понятие паттерна — от паттернов связи и управления, присущих животным и машинам, до общей идеи паттерна как ключевой характеристики жизни. «Мы всего лишь завихрения в потоке вечно текущей реки,— писал он в 1950 году. — Мы — не вещество, которое ждет и терпит; мы — паттерны, которые продолжают и утверждают себя»².

Кибернетическое направление зародилось во времена Второй мировой войны, когда группа математиков, нейробиологов и инженеров — среди них были Норберт Винер, Джон фон Нейман, Клод Шеннон и Уоррен Мак-Каллок — образовала неформальную сеть, отвечающую области их общих интересов³. Их работа была тесно связана с военными исследованиями, касающимися проблемы обнаружения и уничтожения самолетов противника, и финансировалась военными, как и большинство

последующих исследований в области кибернетики.

Первые кибернетики (как они станут называть себя несколько лет спустя) поставили перед собой задачу: раскрыть нейромеханизмы, лежащие в основе психических явлений, и описать их на ясном математическом языке. Таким образом, в то время как организменные биологи интересовались материальной стороной картезианского раскола и ниспровергали механицизм, исследуя природу биологической формы, кибернетики обратились к ментальному аспекту. С самого начала их намерение заключалось в создании точной науки о разуме⁴. И хотя их подход имел вполне механистический характер и концентрировался на общих для животных и машин паттернах, он содержал множество новаторских идей, которые оказали громадное влияние на последующие системные концепции ментальных явлений. Действительно, современная наука о познании, предлагающая единую научную концепцию мозга и разума, зарождалась именно во времена первых кибернетиков.

Концептуальная структура кибернетики была разработана в ходе легендарных встреч в Нью-Йорке, известных как *конференции Мэйси*⁵. Эти встречи — в особенности, первая в 1946 г. — стали исключительным стимулом, объединившим уникальную группу высокоодаренных творческих людей, которые участвовали в интенсивных междисциплинарных диалогах, разрабатывая новые идеи и методы мышления. Участники разделились на две основные группы. Первая сформировалась вокруг изначальных кибернетиков и состояла из математиков, инженеров и нейробиологов. Во вторую группу вошли ученые гуманитарного направления; они объединились вокруг Грегори Бэйтсона и Маргарет Мид. Начиная с самой первой встречи, кибернетики прилагали интенсивные усилия к тому, чтобы навести мосты через академическую пропасть между ними самими и гуманитариями.

На протяжении всего цикла конференций Норберт Винер играл доминирующую роль в среде своих коллег, вдохновляя их своим научным энтузиазмом и поражая блеском идей и независимыми от авторитетов подходами. По свидетельству многих очевидцев, он смущал их своей склонностью неизменно засыпать в ходе дискуссии и даже похрапывать, не теряя, впрочем, нити беседы. Проснувшись, он сразу же выступал с подробными и глубокими комментариями или указывал на логические промахи. Он получал огромное наслаждение от этих обсуждений и той центральной роли, которую в них играл.

Винер был не только блестящим математиком, но и, безусловно, выдающимся философом (между прочим, свою докторскую степень в Гарварде он получил в области философии). Он живо интересовался биологией и ценил богатство естественных живых систем. Его взгляд был

направлен дальше механизмов связи и управления, к общим паттернам организации; он пытался связать свои идеи с широким диапазоном социальных и культурных вопросов.

Джон фон Нейманн был вторым центром притяжения на конференциях Мэйси. Математический гений, он написал классический трактат по квантовой теории, основал теорию игр и прославился на весь мир как изобретатель цифрового компьютера. У фон Нейманна была мощная память, и его ум работал с неимоверной скоростью. О нем говорили, что он мог почти мгновенно вникнуть в суть математической проблемы и проанализировать любую задачу, математическую или практическую, настолько ясно и исчерпывающе, что дальнейшего обсуждения уже не требовалось.

На мэйсианских встречах фон Нейманн увлекся процессами, протекающими в человеческом мозге; он понял, что описание работы мозга на языке формальной логики представляет грандиозную задачу для современной науки. Он с большим доверием относился к силе логики и свято верил в технологию. В течение всей своей деятельности он искал универсальные логические структуры научного знания.

У фон Нейманна и Винера было много общего⁶. Ими обоими восхищались как математическими гениями, и их влияние на общество превосходило влияние любого другого математика их поколения. Оба доверяли своему подсознательному разуму. Подобно многим поэтам и художникам, они имели привычку перед сном класть карандаш и бумагу у изголовья и использовать образы сновидений в своей работе. Тем не менее эти два пионера кибернетики значительно расходились во взглядах на науку. В то время как фон Нейманн интересовался управлением, программами, Винер ценил богатство естественных паттернов и мечтал о всеобъемлющем концептуальном синтезе.

В силу этих особенностей Винер держался вдали от людей, наделенных политической властью, тогда как Нейманн чувствовал себя в их компании весьма комфортно. На конференциях Мэйси различие в их отношении к власти, в особенности к военной, стало источником нарастающих трений между ними и в конечном счете привело к полному разрыву. Если Нейманн на протяжении всей своей карьеры оставался военным консультантом, специализируясь по использованию компьютеров в системах оружия, то Винер прекратил деятельность в военной сфере вскоре после конференций Мэйси. «В дальнейшем я не намерен публиковать те мои работы, — писал он в конце 1946 г., — которые могут принести вред, попав в руки безответственных милитаристов»⁷.

Норберт Винер оказал значительное влияние на Грегори Бэйтсона, с которым поддерживал тесную связь на конференциях Мэйси. Разум

Бэйтсона, как и разум Винера, свободно странствовал по различным дисциплинам, бросая вызов исходным допущениям и методам многих наук, ведя поиск общих паттернов, мощных универсальных абстракций. Бэйтсон ощущал себя прежде всего биологом и считал все те области, в которых ему доводилось работать, — антропологию, эпистемологию, психиатрию и прочие — ответвлениями биологии. Та великая страсть, которую он принес в науку, охватывала все многообразие явлений, связанных с жизнью. Его основная задача заключалась в обнаружении общих принципов организации в мире этого разнообразия — «связующего паттерна», как он определил это много лет спустя⁸. На кибернетических конференциях и Бэйтсон, и Винер искали всеобъемлющие холистические описания, внимательно следя за тем, чтобы оставаться при этом в границах науки. Следуя этому принципу, они создали системный подход, применимый к широкому диапазону феноменов.

Диалоги с Винером и другими кибернетиками оказали устойчивое влияние на последующие работы Бэйтсона. Он первым применил системное мышление в семейной терапии, разработал кибернетическую модель алкоголизма и стал автором теории *раздвоения* [double-bind theory] применительно к шизофрении; эта теория оказала большое влияние на работу Р. Д. Лэинга [Laing] и многих других психиатров. Однако, пожалуй, наиболее важным вкладом Бэйтсона в науку и философию стала основанная на кибернетических принципах концепция разума, которую он разработал в 60-е годы. Эта революционная работа открыла дверь к пониманию природы разума как системного феномена и стала первой удачной научной попыткой преодолеть картезианский раскол между разумом и телом⁹.

На всех десяти конференциях Мэйси председательствовал профессор психиатрии и психологии из университета в Иллинойсе Уоррен Мак-Каллок, известный авторитет в области исследований мозга. Именно его присутствие гарантировало, что стремление достигнуть нового понимания разума и мозга останется в центре дискуссии.

Годы зарождения кибернетики, помимо своего продолжительного влияния на системное мышление в целом, дали впечатляющую серию практических достижений. Поразительно, по большинство новаторских идей и теорий обсуждались, по крайней мере в основных чертах, уже на самой первой встрече¹⁰. Первая конференция началась с обширного описания цифровых компьютеров (которые к тому времени еще не существовали физически), представленного Джоном фон Нейманном; далее последовало убедительное изложение тем же фон Нейманном аналогий между компьютером и мозгом. Основу этих аналогий (которые в течение последующих трех десятилетий доминировали в кибернетическом взгляде на обучение) составляло использование математической логики

для понимания функционирования мозга — это было одно из наиболее значительных достижений кибернетики.

За презентациями фон Нейманна последовало подробное обсуждение Норбертом Винером центральной идеи его работы — концепции обратной связи. Затем Винер представил целый ряд новых идей, которые впоследствии нашли свое место в теории информации и теории связи. Грегори Бэйтсон и Маргарет Мид заключили презервации обзором существующей концептуальной структуры социальных наук. Они признали эту структуру неадекватной и показали, что она нуждается в основополагающей теории — в свете новых кибернетических концепций.

Обратная связь

Все основные достижения кибернетики берут начало в сравнительном анализе организмов и машин, т. е. в механистических моделях живых систем. Тем не менее кибернетические машины значительно отличаются от заводных механизмов Декарта. Критическая разница заключается в концепции обратной связи, разработанной Норбертом Винером, и выражается в самом смысле понятия «кибернетика». Петля обратной связи представляет собой кольцевую систему причинно связанных элементов, в которой изначальное воздействие распространяется вдоль узлов петли так, что каждый элемент оказывает влияние на последующий, пока последний из них не «принесет сообщение» первому элементу петли (рис. 4-1). Следствием такой организации является то, что первое звено («вход») подвергается влиянию последнего («выхода»); это и означает саморегулирование всей системы, поскольку изначальное влияние модифицируется каждый раз, когда оно обходит всю петлю. Обратная связь, по словам Винера, представляет собой «управление машиной на основе ее *реального*, а не *ожидаемого* поведения»¹¹. В более широком смысле, обратная связь стала означать передачу информации о результате любого процесса или любой деятельности к их первоисточнику.

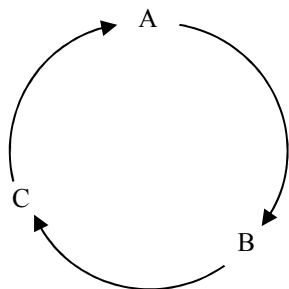


Рис. 4-1. Циклическая причинность в петле обратной связи

Придуманый Винером пример с рулевым — один из простейших примеров петли обратной связи (рис. 4-2). Когда лодка отклоняется от

установленного курса, скажем вправо, рулевой оценивает отклонение, а затем осуществляет противодействие, поворачивая руль влево. Это уменьшает отклонение лодки и даже может привести к переходу через нужное направление и отклонению влево. В некоторый момент, в ходе движения, рулевой производит новую оценку отклонения лодки, осуществляет новое противодействие, снова оценивает отклонение и т. д. Таким образом, поддерживая курс лодки, он полагается на постоянную обратную связь, причем реальная траектория лодки все время колеблется относительно установленного направления. Мастерство управления лодкой состоит в том, чтобы сделать эти колебания как можно менее заметными.

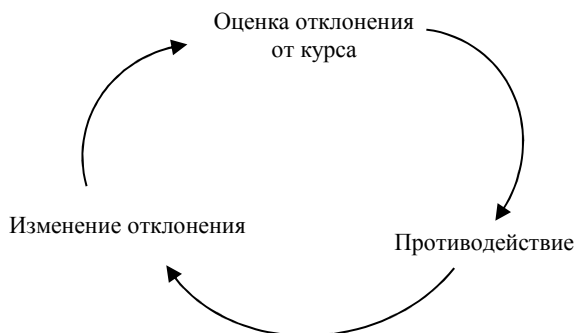


Рис. 4-2. Петля обратной связи, представляющая управление лодкой

Похожий механизм обратной связи работает, когда мы едем на велосипеде. Сначала, когда мы только обучаемся езде, нам бывает трудно отслеживать обратную связь из-за постоянных изменений равновесия. Соответственно, нам трудно и управлять велосипедом. Так, переднее колесо у новичка, как правило, сильно рыскает. Но по мере роста мастерства мозг начинает отслеживать, оценивать и реагировать на обратную связь автоматически, колебания переднего колеса уменьшаются, и велосипед движется по прямой.

Саморегулирующиеся машины, содержащие петли обратной связи, существовали задолго до появления кибернетики. Центробежный регулятор парового двигателя, изобретенный Джеймсом Уаттом в конце восемнадцатого столетия, является классическим примером, а первые термостаты были изобретены еще раньше¹². Инженеры, которые разрабатывали первые устройства обратной связи, описывали их работу и изображали их механические детали на чертежах, однако они никогда не понимали заложенные в них паттерны круговой причинности. В девятнадцатом веке знаменитый физик Джеймс Кларк Максвелл осуществил формальный математический анализ регулятора пара, но при этом он Даже не упомянул принцип петли, лежащий в основе его работы.

Должно было миновать еще целое столетие, прежде чем стало очевидным Родство между обратной связью и круговой причинностью. Именно в эти времена, на начальном этапе развития кибернетики, машины, содержащие петли обратной связи, привлекли внимание инженеров и стали называться *кибернетическими машинами*.

Первое подробное обсуждение петель обратной связи появилось в статье Норберта Винера, Джулиана Бигелоу и Артуро Розенблюта, опубликованной в 1943 г. и озаглавленной «*Поведение, цель и телеология*». В этой новаторской работе авторы не только представили идею круговой причинности как логического паттерна, лежащего в основе технической концепции обратной связи, но также впервые применили ее к модели поведения живых организмов. Занимая строгую бихевиористскую позицию, они утверждали, что поведение любой машины или организма, характеризующееся саморегулированием через обратную связь, может быть названо «целенаправленным», поскольку такое поведение преследует некую цель. Они иллюстрировали свою модель целенаправленного поведения многочисленными примерами — кошка ловит мышь; собака берет след; человек берет стакан со стола и т. д. — и проанализировали эти примеры на языке заложенных в них круговых паттернов обратной связи.

Винер и его коллеги считали обратную связь существенным механизмом гомеостаза — саморегулирования, которое позволяет живым организмам поддерживать себя в состоянии динамического равновесия. Когда Уолтер Кэннон десятилетием раньше в известной книге «*Мудрость тела*»¹⁴ ввел понятие гомеостаза, он дал также подробное описание многих саморегулирующихся метаболических процессов, но так и не определил в явном виде замкнутые причинные петли, содержащиеся в них. Таким образом, концепция обратной связи, введенная кибернетиками, привела к новому пониманию многих присущих жизни саморегулирующихся процессов. Сегодня мы понимаем, что петли обратной связи повсеместно встречаются в живом мире, поскольку они являются неотъемлемой частью нелинейных сетей, характерных для живых систем.

Кибернетики различают два типа обратной связи — уравнивающую (или *отрицательную*) и усиливающую (или *положительную*) обратную связь. Примерами последней служат хорошо известные режимы, или порочные круги, когда машина идет «вразнос», так как изначальное воздействие постоянно усиливается с каждым новым прохождением по петле.

Поскольку специальные значения «отрицательного» и «положительного» в этом контексте могут легко ввести в заблуждение, нам, видимо, следует объяснить их более подробно¹⁵. Причинное влияние в направлении от А к Б определяется как положительное, если изменение в А приводит к

изменению того же направления в Б: увеличение А влечет за собой увеличение Б, а уменьшение А приводит к уменьшению Б. Причинное звено определяется как отрицательное, если изменение Б происходит в противоположном направлении, т. е. Б уменьшается, когда А увеличивается, и увеличивается, когда А уменьшается.

Например, в петле обратной связи, представляющей управление лодкой (петля повторно воспроизведена на рис. 4-3), связь между «оценкой отклонения» и «противодействием» является положительной: чем значительнее отклонение от установленного курса, тем интенсивнее «противодействие».

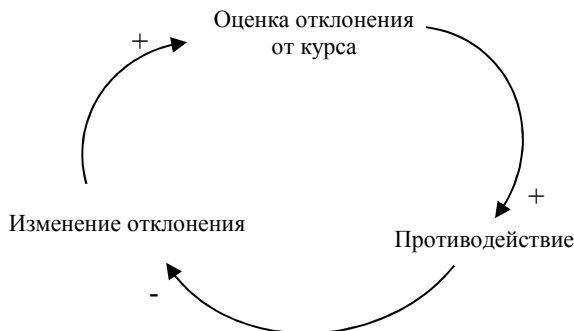


Рис. 4-3. Положительные и отрицательные причинные звенья

Следующая связь, однако, уже отрицательная: чем интенсивнее противоусилие, тем стремительнее уменьшается отклонение. И, наконец, последняя связь опять положительна. Поскольку отклонение уменьшается, по новой оценке его значение снизится по сравнению с предыдущей оценкой. Следует помнить, что значки «+» и «-» означают не увеличение или уменьшение, а *относительное направление изменения* связанных элементов: «+» означает одинаковое направление, а «-» противоположное.

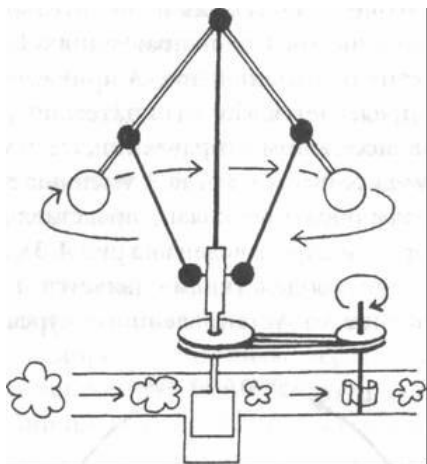


Рис. 4-4. Центробежный регулятор

Причина, по которой значки «+» и «-» оказались столь удобными, заключается в том, что они дают очень простое правило определения общего характера петли обратной связи. Она будет самобалансирующейся (отрицательной), если содержит нечетное количество отрицательных связей¹⁶. В нашем примере есть лишь одна отрицательная связь, значит, вся петля имеет отрицательный, т. е. самобалансирующий характер. Часто петли обратной связи состоят как из положительных, так и отрицательных причинных связей, и тогда их общий характер легко определяется простым подсчетом количества отрицательных звеньев в петле.

Примеры управления лодкой и велосипедом идеально подходят для иллюстрации понятия обратной связи, поскольку они относятся к хорошо освоенному человеком опыту и их понимают сразу. Для иллюстрации таких же принципов в механических устройствах для саморегулирования Винер и его коллеги часто использовали один из самых ранних и простейших примеров обратной связи в технике — центробежный регулятор парового двигателя (рис. 4-4).

Он состоит из вращающейся оси с двумя грузами («маховиками»), прикрепленными к ней таким образом, что под действием центробежной силы они расходятся, когда скорость вращения увеличивается. Регулятор расположен на вершине цилиндра парового двигателя, а грузы соединены с клапаном, который перекрывает пар, когда эти грузы расходятся в стороны. Давление пара управляет двигателем, двигатель управляет маховым колесом. Маховое колесо, в свою очередь, управляет описанным выше регулятором, и таким образом замыкается причинно-следственный цикл.



Рис. 4-5. Петля обратной связи для центробежного регулятора

Последовательность звеньев обратной связи легко читается на схеме рис. 4-5. Увеличение скорости двигателя приводит к увеличению скорости вращения регулятора. В результате увеличивается расстояние между грузами, что приводит к прекращению подачи пара. Когда подача пара падает, скорость двигателя также снижается; замедляется вращение регулятора; грузы сближаются; подача пара возрастает; двигатель опять набирает обороты; и т. д. Единственная отрицательная связь в этой петле — между «расстоянием между отвесами» и «подачей пара»; таким образом, полная петля обратной связи имеет отрицательный, т. е. саморегулирующий характер.

Уже в период зарождения кибернетики Норберт Винер был убежден в том, что обратная связь — важнейший компонент моделирования не только живых организмов, но также и социальных систем. В книге «Кибернетика» он писал:

Не подлежит сомнению, что социальная система является организационной структурой, подобной индивиду, то есть ее объединяет система связи, и она обладает динамикой, в которой круговые процессы типа обратной связи играют важную роль¹⁷.

Именно открытие обратной связи как общего паттерна жизни, применимого к организмам и социальным системам, вызвало такой взволнованный интерес Грегори Бэйтсона и Маргарет Мид к кибернетике. Занимаясь исследованиями в социальной сфере, они наблюдали множество примеров круговой причинности в социальных процессах; на конференциях Мэйси динамику этих процессов удалось отчетливо представить в виде последовательной и связной модели.

За всю историю социальных наук было изобретено множество метафор для описания саморегулирующих процессов в социальной жизни. Из наиболее известных — «невидимая рука», регулирующая рынок в

экономической теории Адама Смита, «проверки и противовесы» в Конституции США, а также взаимодействие тезиса и антитезиса в диалектике Гегеля и Маркса. Все явления, описываемые этими моделями и метафорами, обязательно включают в себя круговые паттерны причинности, которые можно представить в виде петель обратной связи, — и все же ни один из их авторов не выявил этого факта¹⁸.

Если круговых логических паттернов самобалансирующей обратной связи никто не замечал до появления кибернетики, то паттерн самоусиливающей обратной связи, в просторечии называемый «порочным кругом», был известен сотни лет назад. Эта выразительная метафора описывает неблагоприятную ситуацию *самоухудшения* в круговой последовательности событий. Возможно, круговая природа таких самоусиливающих петель обратной связи была осознана гораздо раньше потому, что их последствия гораздо более драматичны, чем в самобалансирующих, отрицательных петлях обратной связи, широко распространенных в живом мире.

Существуют и другие известные метафоры для описания эффекта самоусиливающей обратной связи¹⁹. Один из общеизвестных примеров — «накликанная беда», когда изначально безосновательные страхи толкают человека к действиям, в результате которых эти страхи становятся обоснованными и оправданными; другой пример — «эффект агитвагона», когда сомнительное движение получает социальную поддержку лишь за счет растущего числа его сторонников.

Несмотря на то, что самоусиливающая обратная связь широко запечатлена в народной мудрости, она практически не играла никакой роли на первых этапах развития кибернетики. Кибернетики круга Норберта Винера признавали существование этих феноменов, однако не пытались вникнуть глубже в их суть. Вместо этого они сосредоточили свое внимание на саморегулирующихся процессах гомеостаза в живых организмах. Действительно, усиливающая обратная связь в чистом виде редко встречается в природе, поскольку она, как правило, уравнивается петлями отрицательной обратной связи, ограничивающей тенденции к нарастанию.

В любой экосистеме, например, каждый вид обладает потенциалом экспоненциального увеличения своей численности, однако эта тенденция находится под контролем различных уравнивающих взаимодействий внутри самой системы. Экспоненциальное нарастание может произойти только в случае серьезных нарушений в экосистеме. Тогда некоторые растения превращаются в «сорняки», некоторые животные — во «вредителей», а некоторые виды просто истребляются — и вот уже под угрозой оказывается равновесие всей системы.

В 1960-е годы антрополог и кибернетик Магоро Маруяма предпринял изучение самоусиливающихся, или «усиливающих отклонение», процессов положительной обратной связи. В своей знаменитой статье «Вторая кибернетика»²⁰ он представил схемы обратной связи, в которых поместил знаками «+» и «-» их причинные узлы, и использовал эти удачные обозначения для подробного анализа взаимодействия процессов отрицательной и положительной обратной связи в биологических и социальных явлениях. Таким образом, он связал кибернетическую концепцию обратной связи с понятием *взаимной причинности*, которое к тому времени было разработано социальными исследователями, и тем самым значительно способствовал распространению влияния кибернетических принципов на социальную мысль²¹.

С точки зрения истории системного мышления, одним из наиболее важных аспектов широкого изучения кибернетиками петель обратной связи стало осознание того, что они отражают паттерны организации. Круговая причинность в петле обратной связи отнюдь не предполагает, что элементы соответствующей физической системы соединены в кольцо. Петли обратной связи — это абстрактные паттерны взаимоотношений, заложенных в физические структуры или в деятельность живых организмов. Впервые в истории системного мышления кибернетики провели четкую границу между паттерном организации системы и ее физической структурой; это различие оказалось исключительно важным для современной теории живых систем²².

Теория информации

Важным разделом кибернетики стала теория информации, разработанная Норбертом Винером и Клодом Шэнноном в конце 40-х годов. Она возникла из попыток Шэннона, работавшего в лаборатории *Белл Телефон*, определить и измерить количество информации, передаваемой по телеграфным и телефонным линиям, с тем чтобы оценить их производительность и выработать основу для тарифов на оплату сообщений.

Слово «информация» в *теории информации* используется как специальный технический термин, смысл которого существенно отличается от обыденного значения этого слова и не имеет ничего общего со *смыслом сообщения*. Это привело к бесконечным заблуждениям. По мнению Хайнца фон Форстера, регулярного участника и издателя научных трудов конференций Мэйси, вся проблема возникла из-за досадной лингвистической ошибки — смешения понятий «информация» и «сигнал»; эта ошибка и побудила кибернетиков назвать свое детище теорией информации, а не теорией сигналов²³.

Главной проблемой теории информации является получение

сообщения, закодированного как сигнал, через канал с помехами. Норберт Винер, однако, подчеркивал и тот факт, что закодированное сообщение, в сущности, представляет собой паттерн организации; проводя аналогию между такого рода паттернами связи, с одной стороны, и паттернами организации в организмах — с другой, он подготовил почву для осмысления живой системы как совокупности паттернов.

Кибернетика мозга

В 1950— 60-е годы Росс Эшби стал ведущим теоретиком кибернетического движения. Как и Мак-Каллок, Эшби был нейробиологом по образованию, но он пошел гораздо дальше Мак-Каллока в области изучения нервной системы и разработки кибернетических моделей нейронных процессов. В книге *«Конструкция мозга»* Эшби попытался объяснить уникальную приспособляемость поведения мозга, возможности памяти и другие паттерны функционирования мозга в рамках чисто механистических и детерминистских понятий. «Следует предположить, — писал он, — что машина или животное ведет себя в определенный момент определенным образом, потому что ее(его) физическая и химическая природа в этот момент не допускает никакого другого действия»²⁴.

Очевидно, что подход Эшби к кибернетике был гораздо более картезианским, чем взгляды Норберта Винера, который четко различал немеханистическую живую систему и представляющую ее механистическую модель. «Когда я сравниваю живой организм с... машиной, — писал Винер, — я ни в коей мере не имею в виду, что специфические физические, химические и духовные процессы жизни, как мы ее знаем, тождественны процессам в машинах, имитирующих жизнь»²⁵.

Несмотря на свое строго механистическое мировоззрение, Росс Эшби, осуществив подробный анализ сложнейших кибернетических моделей нейронных процессов, значительно продвинул вперед нарождающуюся когнитивную дисциплину. В частности, он четко определил живые системы как энергетически открытые и в то же время — выражаясь современным языком — организационно закрытые: «Кибернетика может... быть определена, — писал Эшби, — как изучение систем, открытых для энергии, но закрытых для информации и управления — *информационно непроницаемых*»²⁶.

Компьютерная модель обучения

Когда кибернетики исследовали паттерны связи и управления, стремление понять «логику разума» и выразить ее математическим языком постоянно оставалось в самом центре их внимания. Так, в течение более чем десяти лет ключевые идеи кибернетики развивались как увлекательное взаимодействие между биологией, математикой и техникой. Подробные исследования нервной системы человека привели к осмыслению модели

мозга как логической схемы с нейронами в качестве ее основных элементов. Эта концепция стала решающим шагом к изобретению цифровых компьютеров, что, в свою очередь, обеспечило концептуальную основу нового подхода к исследованию психики. Изобретение Джоном фон Нейманом компьютера и его же гипотеза об аналогии между работой компьютера и мозга так тесно переплетены, что трудно отдать пальму первенства одному из этих событий.

Компьютерная модель психической деятельности доминировала в когнитивной науке и в области исследований мозга на протяжении последующих тридцати лет. Основная идея заключалась в том, что человеческий интеллект подобен интеллекту компьютера до такой степени, что обучение — процесс познания — может быть определено как процесс обработки информации, т. е. как манипулирование символами, основанное на некотором наборе правил²⁷.

Прямым следствием этой концепции явились интенсивные разработки *искусственного интеллекта*, и вскоре литературу заполнили неистовые пророчества о наступлении эры «компьютерного разума». Так, Герберт Саймон и Аллен Ньюэлл писали еще в 1958 году:

Уже есть в мире машины, которые мыслят, обучаются и творят. Более того, эти их способности будут быстро совершенствоваться, пока — и это уже обозримое будущее — диапазон проблем, с которыми они могут справляться, не сравняется с той сферой, в которой до сих пор использовался человеческий разум²⁸.

Это предсказание сегодня так же абсурдно, как и 38 лет назад, и все же в него повсеместно верят. Энтузиазм ученых и общественности в отношении компьютера как модели человеческого мозга являет интересную параллель с энтузиазмом Декарта и его современников в отношении часового механизма как модели человеческого тела²⁹. Для Декарта часы были уникальной машиной. Это была единственная машина, которая функционировала автономно, т. е. работала сама по себе будучи единожды заведенной. Это были времена французского барокко, когда часовые механизмы широко использовались для разработки искусных «одушевленных» механических игрушек, которые восхищали людей магией своих якобы спонтанных движений. Как и большинство его современников, Декарт был очарован этими автоматами и считал естественным сравнивать их работу с функционированием живых организмов:

Мы наблюдаем часы, искусственные фонтаны, мельницы и другие подобные машины, которые, будучи всего лишь произведениями человека, обладают, тем не менее, способностью двигаться самостоятельно несколькими различными способами... Я не признаю

никакой разницы между машинами, изготовленными ремесленниками, и различными телами, которые творит лишь одна природа³⁰.

Заводные часы XVII века были первыми автономными машинами, и в течение трехсот лет они оставались единственными машинами подобного рода — пока не появился компьютер. Компьютер — это опять нечто новое, неизведанная и уникальная машина. Он не только движется автоматически (если его запрограммировать и включить в сеть); он делает нечто совершенно новое — обрабатывает информацию. И поскольку фон Нейманн и ранние кибернетики верили в то, что человеческий мозг тоже обрабатывает информацию, им представлялось естественным считать компьютер моделью мозга и даже разума, как для Декарта было естественным использовать часы в качестве модели тела.

Подобно картезианской модели тела как заводных часов, модель мозга как компьютера поначалу представлялась весьма полезной. Она сулила волнующие перспективы для нового научного понимания обучения и открывала новые, свежие направления для исследований. К середине шестидесятых, однако, изначальная модель, которая воодушевила ученых на анализ ее же ограничений и обсуждение альтернатив, затвердела до состояния догмы; это нередко случается в науке. В течение последующего десятилетия почти всюду в нейробиологии доминировала концепция обработки информации; ни истоки, ни основные предположения этой концепции уже практически не подвергались сомнению.

Ученые-компьютерщики внесли значительную лепту в бетонирование догмы об обработке информации, используя выражения типа «интеллект», «память» и «язык» для описания компьютеров, что побудило большинство людей — включая и самих ученых — думать, что эти понятия относятся к хорошо известным человеческим феноменам. Это, однако, оказалось глубоким заблуждением, которое помогает поддерживать и даже укреплять картезианский образ людей-машин.

Последние достижения когнитивной науки принесли ясность: человеческий интеллект совершенно отличается от машинного, искусственного интеллекта. Нервная система человека не обрабатывает никакой информации (в том смысле, что готовые дискретные элементы существуют во внешнем мире и отбираются познающей системой), но взаимодействует с окружающей средой, непрерывно видоизменяя свою структуру³¹. К тому же нейробиологи обнаружили серьезные доказательства того, что человеческий интеллект, человеческая память и человеческие решения никогда не бывают полностью рациональными, зато всегда окрашены эмоциями — как мы хорошо знаем из собственного опыта³². Наше мышление всегда сопровождается телесными ощущениями

и процессами. Мы, правда, нередко стараемся подавить их, но всегда думаем *вместе* со своим телом; а поскольку компьютеры не обладают подобными телами, сугубо человеческие проблемы всегда будут чужды их «разуму».

Из этих соображений следует, что определенные задачи никогда не следует оставлять на откуп компьютерам, как об этом выразительно сказал Иозеф Вайценбаум в своей классической книге *«Компьютерная мощь и человеческое благоразумие»*. К таким задачам относятся все те, которые требуют истинно человеческих качеств — мудрости, сострадания, уважения, понимания, любви. Поручив компьютерам решения и отношения, которые требуют этих качеств, мы сделаем нашу жизнь бесчеловечной. Вайценбаум пишет:

Должна быть проведена граница, разделяющая человеческий и машинный разум. Если такой границы не будет, тогда проповедники компьютеризированной психотерапии просто превратятся в глашатаев новой эры, в которой человек — не что иное, как заводной механизм... Сама постановка вопроса — «Что известно судье (или психиатру) такого, что мы не можем сказать компьютеру?» — является чудовищной непристойностью³³.

Влияние на общество

Благодаря своему родству с механистической наукой и тесным связям с военными, кибернетика с самого начала пользовалась очень высоким престижем в среде научного истеблишмента. С годами этот престиж рос одновременно с быстрым распространением компьютеров во всех слоях индустриального общества и радикальными переменами во всех сферах нашей жизни. Норберт Винер предсказывал эти перемены, которые часто, особенно в первые годы развития кибернетики, сравнивали со второй промышленной революцией. Более того, он отчетливо осознавал теневую сторону новых технологий, которые сам же помогал создавать:

Те из нас, кто внес свой вклад в новую науку кибернетику... очутились в нравственной позиции, мягко выражаясь, не очень комфортной. Мы причастны к зарождению новой науки, в которую... входят и технические достижения, чреватые огромными возможностями для добра и для зла³⁴.

Давайте помнить, что автоматическая машина... это точный экономический эквивалент рабского труда. Любой труд, конкурирующий с рабским, должен принимать экономические условия рабского труда. Абсолютно ясно, что это породит ситуацию с безработицей, по сравнению с которой теперешний спад или даже депрессия тридцатых покажутся милой шуткой³⁵.

Анализируя эти и другие подобные высказывания Винера, нельзя не

увидеть, что он проявлял гораздо больше мудрости и осмотрительности в оценке влияния компьютеров на общество, чем его последователи. Сегодня, сорок лет спустя, компьютеры и другие «информационные технологии», разработанные за этот период, быстро приобретают автономный и тоталитарный характер, изменяя наши основные понятия и исключая альтернативные мировоззрения. Как показали Нил Постмен, Джерри Мэндер и другие критики технологии, это типично для «мега-технологий», которые уже доминируют в индустриальных обществах всего мира³⁶. В возрастающих масштабах все формы культуры подчиняются технологии, и именно технологические инновации, а не повышение благосостояния человечества стали синонимом прогресса.

Духовное обнищание и утрата культурного разнообразия в результате чрезмерного использования компьютеров приобретают серьезный характер, особенно в области образования. Как это кратко формулирует Нил Постмен: «Когда для обучения используется компьютер, меняется смысл обучения»³⁷. Применение компьютеров в системе образования часто превозносится как революция, которая в конечном счете преобразит все грани учебного процесса. Эта точка зрения энергично пропагандируется мощной компьютерной индустрией и побуждает учителей использовать компьютеры в качестве обучающего инструмента на всех уровнях — вплоть до детских садов и других дошкольных учреждений! — даже не задумываясь о множестве пагубных эффектов, которые может повлечь за собой эта безответственная практика³⁸.

Применение компьютеров в школах основано на устаревшем представлении о человеческих существах как об информационных процессорах; тем самым укрепляются ошибочные механистические концепции мышления, познания и коммуникации. Информация представляется как основа мышления, тогда как в реальности человеческий разум думает посредством идей, а не информации. Как Теодор Рошак подробно показывает в своем *«Культе информации»*, не информация создает идеи, а идеи создают информацию. Идеи представляют собой интегрирующие паттерны, которые возникают не из информации, а из опыта³⁹.

В компьютерной модели обучения знание рассматривается как свободное от контекста и системы ценностей и основанное на абстрактных Данных; на самом же деле всякое содержащее смысл знание контекстуально, причем большая часть его невербальна и имеет эмпирический характер. Подобным же образом, язык рассматривается как некий канал, по которому передается «объективная» информация. В действительности же, как красноречиво показывает К. Э. Бауэре, язык метафоричен и Передает невербальные сведения, постижимые в рамках культуры⁴⁰. В этой связи важно еще отметить, что язык компьютерных

инженеров и ученых полон метафор, заимствованных у военных, — «команда», «запуск», «цель» и т. п., — что вносит некоторое культурное смещение, укрепляет стереотипы и отстраняет определенные группы, включая большинство девочек школьного возраста, от полноценного участия в учебном процессе⁴¹. С этим связано еще одно тревожное обстоятельство — связь между компьютерами, насилием и милитаристской природой большинства компьютерных видеоигр.

После тридцати лет господства в области исследований мозга и познания, после построения живучей и до сих пор распространенной технологической парадигмы, миф об обработке информации в конце концов стал подвергаться серьезным сомнениям⁴². Критические аргументы выдвигались еще на заре развития кибернетики. К примеру, утверждалось, что реальный мозг не подчиняется правилам; что в нем нет центрального логического процессора; что информация не хранится локально. Скорее, мозг функционирует на основе сплошной связности, хранит информацию в распределенном виде и проявляет способность к самоорганизации, которая совершенно отсутствует в компьютерах. Однако эти альтернативные идеи были оттеснены на периферию в интересах господствующего компьютерного мировоззрения — пока не возродились снова тридцать лет спустя, в 70-е годы, когда системные философы заинтересовались новым феноменом под многообещающим названием: *самоорганизация*.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 4

1. Wiener (1948). Эта фраза появляется в подзаголовке книги.
2. Wiener (1950), p. 96.
3. См. Heims(1991).
4. См. Varela и др. (1991), p. 38.
5. См. Heims(1991).
6. См. Heims(1980).
7. Цитируется там же, p. 73.
8. См. Capra (1988), pp. 73ff.
9. См. ниже, с. 189 и далее.
10. См. Heims (1991), pp. 19ff.
11. Wiener (1950), p. 24.
12. См. Richardson (1992), pp. 17ff.
13. Цитируется там же, p. 94.
14. Cannon (1932).
15. См. Richardson (1992), pp. 5-7.
16. Говоря несколько более специальным языком, значки «+» и «-»

называются полярностями, и правило гласит, что полярность петли обратной связи является произведением полярностей его причинных звеньев.

17. Wiener (1948), p. 24.
18. См. Richardson (1992), pp. 59ff.
19. См. там же, pp. 79ff.
20. Maruyama (1963).
21. См. Richardson (1991), p. 204.
22. См. ниже, с. 176.
23. Хайнц фон Форстер, частная беседа, январь 1994.
24. Ashby (1952), p. 9.
25. Wiener (1950), p. 32. 26. Ashby (1956), p. 4.
27. См. Varela et al. (1992), pp. 39ff.
28. Цитируется по Weizenbaum (1976), p. 138.
29. См. там же, pp. 23ff.
30. Цитируется по Capra (1982), p. 47.
31. См. ниже, с. 295.
32. См. ниже, с. 304.
33. Weizenbaum (1976), pp. 8, 226.
34. Wiener (1948), p. 38.
35. Wiener (1950), p. 162.
36. Postman (1992), Mander (1991).
37. Postman (1992), p. 19.
38. См. Sloan (1985), Kane (1993), Bowers (1993), Roszak (1994).
39. Roszak (1994), pp. 87ff.
40. Bowers (1993), pp. 17ff.
41. См. Douglas D. Noble, «*The Regime of Technology in Education*», in Kane (1993).
42. См. Varela et al. (1992), pp. 85ff.

ЧАСТЬ III

ЧАСТИ ГОЛОВОЛОМКИ

Глава 5

МОДЕЛИ САМООРГАНИЗАЦИИ

Прикладное системное мышление

В 50— 60-е годы системное мышление оказывало сильное влияние на технику и организацию управления, где системные концепции — в том числе и кибернетические — применялись для решения практических проблем. Эти приложения породили новые дисциплины — системотехнику, системный анализ и системное управление (менеджмент)¹.

По мере того как структура промышленных предприятий стремительно усложнялась с развитием новых химических, электронных и коммуникационных технологий, менеджерам и инженерам приходилось уже не только беспокоиться по поводу огромного количества отдельных компонентов, но и разбираться в эффектах, обусловленных взаимодействием этих компонентов, — как в физических, так и в организационных системах. Так, многие инженеры и руководители проектов в крупных компаниях принялись разрабатывать стратегии и методологии, в которых явно использовались системные концепции. Во многих книгах по системотехнике, опубликованных в 60-е годы, можно было найти такого рода тексты:

Системный инженер должен быть способен предсказать также *внезапные* свойства системы, то есть те, которыми обладает система, но не ее части².

Метод стратегического мышления, известный как «системный анализ», впервые был освоен корпорацией RAND — институтом военных Исследований и разработок, который основан в конце 40-х годов и в Дальнейшем стал моделью для многочисленных «мыслительных центров», специализирующихся в «делании политики» и технологическом маклерстве³. Системный анализ возник из оперативных исследований, анализа и планирования боевых операций во времена Второй мировой войны. Сюда входила и координация использования радаров в противовоздушных операциях — та же проблема, которая побудила к теоретическим разработкам по кибернетике.

В 50-е годы системный анализ вышел за рамки военных применений и превратился в широкий системный подход к анализу рентабельности, который включал математические модели для испытания альтернативных программ, предлагаемых для достижения строго определенной цели. Как говорилось в популярном тексте, опубликованном в 1968 году,

Надо стремиться к тому, чтобы охватить всю проблему в целом, в

контексте, и сравнить альтернативные варианты в свете их возможных результатов⁴.

Вскоре после разработки системного анализа как метода, пригодного для решения сложных организационных проблем в военной области, менеджеры стали использовать новый подход для решения подобных задач в бизнесе. «Системно-ориентированный менеджмент» стал новым лозунгом, и в течение 60-х и 70-х годов был опубликован целый ряд книг по менеджменту, в заглавие которых входило слово «системный»⁵. Техника моделирования «системной динамики», разработанная Джеймсом Форрестером, а также «кибернетика менеджмента» Стэффорда Вира — яркие примеры первых многозначительных формулировок системного подхода в менеджменте⁶.

Десятилетие спустя подобный, но гораздо более тонкий подход к менеджменту был разработан Хансом Ульрихом из Школы бизнеса в Сент-Галлене, Швейцария⁷. Подход Ульриха хорошо известен в европейской сфере менеджмента как «сент-галленская модель». В основе его лежит взгляд на коммерческую организацию как на живую социальную систему. С годами этот метод вобрал в себя множество идей из биологии, когнитивной науки, экологии и теории эволюции. Эти последние достижения породили новую дисциплину — «системный менеджмент», который теперь преподается в европейских школах бизнеса и пропагандируется консультантами по менеджменту⁸.

Расцвет молекулярной биологии

Системный подход оказал значительное влияние на менеджмент и технику в 50—60-е годы, но его использование в биологии того времени, как это ни парадоксально, было весьма незначительным. 50-е годы стали десятилетием громкого триумфа генетики — выявления физической структуры ДНК, которое было провозглашено величайшим открытием в биологии после дарвиновской теории эволюции. На несколько десятилетий эти триумфальные успехи затмили системный взгляд на жизнь. В очередной раз маятник качнулся назад к механицизму.

Достижения генетики произвели значительную перемену в биологических исследованиях, дали новый подход, который до сих пор доминирует в наших академических заведениях. Если в XIX столетии клетки считались базовыми строительными блоками живых организмов, то в середине XX века внимание переместилось от клеток к молекулам, когда генетики стали изучать молекулярную структуру гена.

Продвигаясь в своих исследованиях феноменов жизни в сторону все более мелких уровней, биологи обнаружили, что характеристики всех живых организмов — от бактерии до человека — закодированы в их хромосомах, притом в одинаковом химическом веществе и с

использованием одинакового кодового шифра. После двух десятилетий напряженных исследований точные детали этого кода были раскрыты. Биологи обнаружили алфавит поистине универсального языка жизни⁹.

Этот триумф молекулярной биологии вылился в широко распространенное убеждение, что все биологические функции могут быть объяснены с помощью молекулярных структур и механизмов. Так большинство биологов превратились в пламенных редуccionистов, увлеченных молекулярными тонкостями. Молекулярная биология, изначально лишь небольшая ветвь науки о жизни, теперь превратилась в распространенный и исключительный способ мышления, который приводит к серьезным искажениям в биологических исследованиях.

В то же время во второй половине XX столетия проблемы, не поддающиеся механистическому подходу молекулярной биологии, стали еще более очевидными. Хотя биологам известна точная структура нескольких генов, они очень туманно представляют, каким образом эти гены взаимодействуют и сотрудничают между собой в ходе развития организма. Другими словами, ученые знают алфавит генетического кода, но не имеют понятия о его синтаксисе. Уже теперь очевидно, что подавляющая часть ДНК — возможно, до 95% — может быть использована для интегративных функций, о чем биологи, похоже, не догадываются, поскольку они придерживаются механистических моделей.

Критика системного мышления

К середине 70-х гг. ограничения молекулярного подхода к пониманию жизни стали очевидны. Биологи, однако, всматриваясь в горизонт, ничего нового там не видели. Чистая наука затмила системное мышление до такой степени, что его даже не рассматривали в качестве жизнеспособной альтернативы. В нескольких критических эссе теория систем фактически признавалась интеллектуальным провалом. Роберт Лилиенфельд, к примеру, завершал свой блестящий труд *«Расцвет теории систем»*, опубликованный в 1978 г., уничтожающей критикой:

Системные философы не скрывают своего очарования определениями, концептуализациями и программными заявлениями то ли благожелательного, то ли морализаторского толка... Они коллекционируют и описывают аналогии между феноменами из различных областей... что, похоже, доставляет им эстетическое наслаждение, оправдывающее само себя... До сих пор не появилось ни одного свидетельства о том, что системная теория была использована для решения хотя бы одной значительной проблемы хотя бы в одной области¹⁰.

Последняя часть этого критического пассажа сегодня определенно несостоятельна, как это будет видно из последующих глав нашей книги, и,

пожалуй, она звучала излишне резко даже в 70-е годы. Даже в то время можно было утверждать, что понимание живых организмов как энергетически открытых, но организационно закрытых систем, осознание обратной связи как существенного механизма гомеостаза и кибернетические модели нейронных процессов — вот только три примера, считавшиеся уже тогда установленными фактами, — представляют собой важнейшие достижения в научном понимании жизни.

Тем не менее Лилиенфельд был прав в том смысле, что ни одна из формальных теорий систем, вроде тех, какие рассматривались Богдановым и Берталанфи, не была успешно применена ни в одной области. Цель Берталанфи — развить свою общую теорию систем в «математическую дисциплину, чисто формальную по сути, но применимую к различным эмпирическим наукам», — безусловно, не была достигнута.

Главная причина этого «провала» заключалась в отсутствии математического инструментария, соответствующего сложности живых систем. Как Богданов, так и Берталанфи признавали, что в открытых системах одновременное взаимодействие множества переменных формируют паттерны организации, характерные для жизни, но у них не было средств описания возникновения этих паттернов в математической форме. Говоря техническим языком, математика того времени была ограничена линейными уравнениями, которые не годятся для описания в высшей степени нелинейной природы живых систем¹¹.

Кибернетики, занимаясь нелинейными феноменами петель обратной связи и нейронных сетей, взялись и за разработку соответствующей нелинейной математики; но настоящий прорыв произошел несколько десятилетий спустя и был тесно связан с развитием нового поколения мощных компьютеров.

Хотя системные подходы, развитые в первой половине столетия, не привели к формальной математической теории, они выработали определенную форму мышления, новый язык, новые понятия и саму интеллектуальную атмосферу, которая способствовала значительным научным достижениям последних лет. Вместо формальной *теории систем* в 80-е годы появился целый ряд успешных *системных моделей*, которые описывают разнообразные аспекты явлений жизни. Сегодня именно на основе этих моделей начинает, наконец, зарождаться каркас последовательной теории живых систем и соответствующий ей математический язык.

Важность паттерна

Последние успехи в нашем понимании живых систем основываются на двух научных событиях конца 70-х, в те самые годы, когда Лилиенфельд и другие писали критические статьи по поводу системного мышления.

Одним из них стало открытие новой математики сложных систем, которая обсуждается в следующей главе. Другим событием было появление мощной новаторской концепции самоорганизации; ее идея в неявном виде сквозит в ранних дискуссиях кибернетиков, но она так и не была четко сформулирована в течение последующих тридцати лет.

Чтобы понять феномен самоорганизации, необходимо сначала понять важность паттерна. Идея паттерна организации — конфигурации взаимоотношений, характерной для определенной системы, — стала объектом кибернетического системного мышления и с тех пор остается важнейшей концепцией. С системной точки зрения, понимание жизни начинается с понимания паттерна.

Мы уже видели, что на протяжении всей истории западной науки и Философии существовал конфликт между изучением материи и изучением формы¹². Изучение материи начинается с вопроса «Из чего это сделано?»; изучение формы — с вопроса «Как это сделано, каков его паттерн?». Это два очень разных подхода, которые всегда конкурировали друг с другом в нашей научной и философской традиции.

Изучение материи началось в античной Греции в VI веке до н. э., когда Фалес, Парменид и другие философы спросили: из чего сделана реальность? каковы первичные составляющие материи? в чем ее суть? — ответами на эти вопросы определились разнообразные школы ранней эры греческой философии. Среди них была идея о четырех фундаментальных элементах — земле, воздухе, огне, воде. В новейшее время их — теперь уже *химически чистых* элементов — насчитывается более ста. Это много, но все же конечное число. Из этих первичных элементов, как полагали, сделана вся материя. Затем Дальтон отождествил элементы с атомами, а с расцветом атомной и ядерной физики в XX столетии роль «кирпичиков» стали играть субатомные частицы.

Подобным же образом, в биологии базовыми элементами сначала были организмы, или виды, и в XVIII веке биологи разработали сложные классификационные схемы для растений и животных. Затем, с открытием клеток как элементов, общих для всех организмов, фокус сместился от организмов к клеткам. Потом наконец клетка была расщеплена на свои микромолекулы — ферменты, протеины, аминокислоты и т. д., — и молекулярная биология оказалась новым передовым рубежом исследований. Несмотря на все эти усилия, основной вопрос со времен древних греков не изменился: из чего сделана реальность? каковы ее первичные составляющие?

В то же время, на всем протяжении истории философии и науки постоянно происходило изучение паттерна. Оно начиналось пифагорейцами в Греции, было продолжено алхимиками, поэтами-

романтиками и другими разнообразными интеллектуальными течениями. Тем не менее почти всегда изучение паттерна (по сравнению с изучением материи) отодвигалось на задний план, пока бурно не возродилось в наш век, и теперь системные философы признают его достаточно существенным для понимания жизни.

Я намерен доказать, что путь к созданию всеобъемлющей теории живых систем лежит через синтез этих двух очень разных подходов — изучения материи (или структуры) и изучения формы (или паттерна). При изучении структуры мы измеряем и взвешиваем вещи. Паттерны, однако, не могут быть измерены или взвешены; они должны быть обозначены, вычерчены. Чтобы понять паттерн, мы должны обозначить конфигурацию взаимоотношений. Другими словами, структура включает количества, тогда как паттерн включает качества.

Изучение паттерна существенно для понимания живых систем, поскольку системные свойства, как мы видели, обусловлены конфигурацией упорядоченных взаимоотношений¹³. Системные свойства — это свойства паттерна. То, что разрушается, когда организм разнимается на части, — это и есть его паттерн. Компоненты все присутствуют, но конфигурация взаимоотношений между ними — паттерн — разрушена, и поэтому организм погибает.

Большинство ученых-редукционистов не могут оценить критику редукционизма, потому что им не удастся понять важность паттерна. Они утверждают, что все живые организмы, в конечном счете, сотворены из таких же атомов и молекул, какие являются компонентами неорганической материи, и что законы биологии в таком случае можно свести к законам физики и химии. Хотя все живые организмы в конечном счете состоят из атомов и молекул, они отнюдь не являются *только* атомами и молекулами. Есть в жизни еще нечто нематериальное, не поддающееся упрощению — паттерн организации.

Сети — паттерны жизни

Оценив важность паттерна для понимания жизни, мы теперь можем спросить: существует ли общий паттерн организации, который можно обнаружить во всех живых системах? Далее мы увидим, что в этом как раз и заключается суть проблемы. Этот паттерн организации, общий для всех живых систем, будет подробно обсуждаться ниже¹⁴. Его наиболее важное свойство заключается в том, что это *сетевой* паттерн. Встречаясь с живыми системами — организмами, частями организмов или сообществами организмов, — мы можем заметить, что все их компоненты объединены между собой по сетевому принципу. Окидывая взором жизнь, мы всегда видим сети.

Признание этого пришло в науку в 20-е годы, когда экологи начали

Изучать пищевые паутины. Вскоре после этого, признавая сеть как общий паттерн жизни, системные философы распространили сетевые мо-Дели на все системные уровни. Кибернетики, в частности, пытались понять мозг как нейронную сеть и разработали специальный математический аппарат для анализа ее паттернов. Структура человеческого мозга чрезвычайно сложна. Она содержит около 10 миллиардов нервных клеток (нейронов), которые связаны друг с другом через 1000 миллиардов узлов (синапсов), образуя обширную сеть. Весь мозг может быть разделен на автономные участки, или подсети, которые взаимодействуют друг с другом в сетевом режиме. Все это приводит к сложным паттернам переплетенных паутин, сложных сетей, вложенных в еще более крупные сети¹⁵.

Первое и наиболее очевидное свойство любой сети — ее нелинейность: сеть нелинейна по всем направлениям. Поэтому и взаимоотношения в сетевом паттерне нелинейны. В частности, воздействие, или сообщение, может следовать по круговой траектории, которая становится петлей обратной связи. Понятие обратной связи тесно связано с паттерном сети¹⁶.

Поскольку сети могут содержать в себе петли обратной связи, постольку они приобретают способность регулировать самих себя. Например, сообщество, которое поддерживает активную сеть связи, будет учиться на своих ошибках, потому что последствия ошибки распространяются по сети и возвращаются к источнику по петле обратной связи. Таким образом, сообщество может исправлять свои ошибки, регулировать себя и организовывать себя. Действительно, идея самоорганизации возникла как, возможно, *центральная концепция* системного мировоззрения и, подобно концепциям обратной связи и саморегуляции, тесно связана с сетями. Мы могли бы сказать, что *паттерн жизни — это сетевой паттерн, способный к самоорганизации*. Это простое определение, но оно основано на последних открытиях, сделанных на переднем фронте науки.

Появление концепции самоорганизации

Концепция самоорганизации возникла уже в первые годы кибернетики, когда ученые начали разрабатывать математические модели, представляющие логику, свойственную нейронным сетям. В 1943 г. нейробиолог Уоррен Мак-Каллок и математик Уолтер Питтс опубликовали новаторскую статью, озаглавленную *«Логическое исчисление идей, присущих нервной деятельности»*., в которой показали, что логика любого физиологического процесса, любого поведения может быть трансформирована в правила для построения сети¹⁷.

Авторы представили идеализированные нейроны в виде двоичных переключателей — элементов, которые могут находиться в одном из состояний «вкл» или «выкл», — и дали модель нервной системы как

сложной сети этих двоичных переключателей. В сети Мак-Каллока-Питтса узлы «вкл-выкл» связаны друг с другом таким образом, что активность каждого узла управляется предыдущей активностью других узлов в соответствии с некоторым «правилом переключения». Например, данный узел может в следующий момент переключиться во «вкл» только в случае, если определенное количество смежных с ним узлов находятся в этот момент в положении «вкл». Мак-Каллоку и Питтсу удалось показать, что, хотя двоичные сети такого рода — лишь упрощенные модели, они являются хорошим приближением сетей, составляющих нервную систему.

В 50-е годы ученые начали строить реальные модели таких двоичных сетей; некоторые из моделей содержали в узлах маленькие лампочки, то зажигающиеся, то гаснущие в соответствии с состоянием узла. К великому удивлению ученых, в большинстве цепей после короткого периода беспорядочного мерцания возникали некоторые упорядоченные паттерны. Можно было видеть, как по сети проходили волны мерцания или же наблюдались повторяющиеся циклы. Даже в том случае, когда начальное состояние сети выбиралось произвольно, в ней через некоторое время спонтанно возникали упорядоченные паттерны, и именно это спонтанное возникновение порядка стало известно как *самоорганизация*.

Как только этот многообещающий термин появился в литературе, системные философы стали широко использовать его в различных контекстах. Росс Эшби в одной из своих ранних работ, вероятно, впервые описал нервную систему как «самоорганизующуюся»¹⁸. Физик и кибернетик Хайнц фон Форстер сыграл роль главного катализатора идеи самоорганизации в конце 50-х, организуя конференции по этой теме, оказывая финансовую помощь многим участникам и публикуя их статьи¹⁹.

В течение двух десятилетий Форстер поддерживал междисциплинарную группу, созданную при Университете Иллинойса для изучения самоорганизующихся систем. Она называлась Лабораторией биокомпьютеров и представляла собой тесный круг друзей и коллег, которые работали вдалеке от редукционистского направления и чьи идеи, опережающие время, широко не публиковались. Тем не менее эти идеи стали семенами, из которых в конце 70-х и в 80-е годы выросло множество удачных моделей самоорганизующихся систем.

Сам Хайнц фон Форстер внес свой вклад в теоретическое понимание самоорганизации гораздо раньше. Его исследования касались понятия порядка. Он задался вопросом: существует ли мера порядка, которую можно было бы использовать для оценки увеличения порядка, обусловленного «организацией»? Для решения этой проблемы Форстер использовал концепцию «избыточности», оформленную математически в рамках теории информации Клодом Шэнноном; избыточность и есть мера

относительного порядка системы по отношению к изначальному максимальному беспорядку²⁰.

Позже этот подход был вытеснен новой математикой сложных систем, однако в конце 50-х он позволил Форстеру разработать первую качественную модель самоорганизации в живых системах. Он ввел выражение «порядок из шума», подчеркнув тем самым, что самоорганизующаяся система не просто «импортирует» порядок из своего окружения, но отбирает богатую энергией материю, интегрирует ее в свою структуру и таким способом повышает уровень собственного внутреннего порядка.

В течение 70-х и 80-х годов ключевые идеи этой ранней модели были усовершенствованы и развиты исследователями из многих стран; феномен самоорганизации в разнообразных системах, от микроскопических до очень крупных, изучали Илья Пригожий в Бельгии, Герман Хакен и Манфред Эйген в Германии, Джеймс Лавлок в Англии, Линн Маргулис в США, Умберто Матурана и Франциско Варела в Чили²¹. Все полученные ими модели самоорганизующихся систем обладают некоторыми очень важными общими характеристиками, которым предстоит стать фундаментом единой теории живых систем; очерк такой теории и предлагается к обсуждению в этой книге.

Первое важное отличие между изначальной концепцией самоорганизации в кибернетике и более сложными поздними моделями состоит в том, что последние предусматривают создание новых структур и новых режимов поведения в ходе процесса самоорганизации. Для Эшби все возможные структурные изменения происходят в рамках «резерва разнообразия» структур, а шансы на выживание системы зависят от богатства или «необходимого разнообразия» этого резерва. Здесь не существует ни творчества, ни развития, ни эволюции. Поздние модели, напротив, включают создание новых структур и режимов поведения в процессе развития, обучения и эволюции.

Вторая общая для этих моделей самоорганизации особенность заключается в том, что все они представляют открытые системы, функционирующие вдали от состояния равновесия. Для того чтобы осуществлялась самоорганизация, необходим непрерывный поток материи и энергии сквозь систему. Удивительное *внезапное* зарождение новых структур и новых форм поведения — самое важное отличительное свойство самоорганизации — возможно только при том условии, что система далека от равновесия.

Третья особенность самоорганизации, тоже общая для всех моделей, — нелинейная взаимосвязанность компонентов системы. Физически этот нелинейный паттерн выражается в появлении петель обратной связи;

математически он описывается нелинейными уравнениями.

Суммируя эти три характеристики самоорганизующихся систем, можно сказать, что *самоорганизация — это спонтанное зарождение новых структур и новых форм поведения в далеких от состояния равновесия открытых системах, которое характеризуется появлением внутренних петель обратной связи и математически описывается нелинейными уравнениями.*

Диссипативные структуры

Первым и, вероятно, наиболее впечатляющим подробным описанием самоорганизующихся систем стала *теория диссипативных структур* химика и физика Ильи Пригожина, русского по рождению, Нобелевского лауреата и профессора химии в Свободном Университете в Брюсселе. Пригожий разработал свою теорию на основе изучения физических и химических систем, но, согласно его собственным воспоминаниям, к этому его побудили размышления над природой жизни:

Меня чрезвычайно интересовала проблема жизни... Я всегда думал, что само существование жизни говорит нам нечто очень важное о природе²².

Наибольший интерес у Пригожина вызывал тот факт, что живые организмы способны поддерживать свою жизнь в условиях неравновесия. Он увлекся системами, далекими от теплового равновесия, и начал интенсивные исследования, задавшись целью определить точные условия, при которых неравновесные состояния могут быть устойчивыми.

Радикальный прорыв Пригожий осуществил в начале 60-х, когда понял что системы, далекие от равновесия, должны описываться нелинейными уравнениями. Четкое понимание связи между *отдаленностью от равновесия* и *нелинейностью* позволило Пригожину уловить направление исследований, кульминацией которых десятилетие спустя стала его теория самоорганизации.

Решая загадку устойчивости вдали от равновесия, Пригожий не стал изучать живые системы, а обратился к гораздо более простому феномену тепловой конвекции, который теперь известен как *неустойчивость Бенара* и считается классическим случаем самоорганизации. В начале века французский физик Анри Бенар обнаружил, что подогрев тонкого слоя жидкости может привести к образованию странным образом упорядоченных структур. Когда жидкость равномерно подогревается снизу, устанавливается непрерывный тепловой поток, направленный снизу вверх. Сама жидкость остается неподвижной, действует только теплопроводность. Тем не менее когда разность температур между нижней и верхней поверхностью достигает определенного критического значения, тепловой поток сменяется тепловой конвекцией, при которой тепло

передается через последовательное движение огромного количества молекул.

В этот момент возникает поразительный упорядоченный паттерн шестиугольных ячеек («медовых сот»), в которых горячая жидкость поднимается вверх по центру ячеек, в то время как более холодная опускается вниз вдоль стенок ячеек (рис. 5-1).

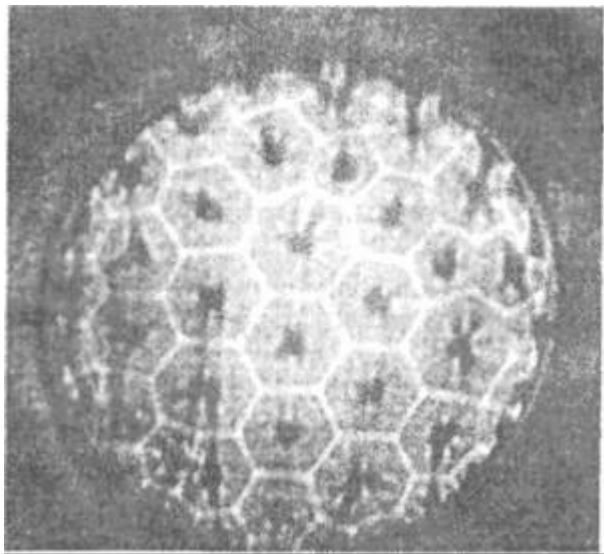


Рис. 5-1.

Паттерн шестиугольных бенаровских ячеек в цилиндрическом контейнере, вид сверху. Диаметр контейнера равен приблизительно 10 см, глубина жидкости • около 0,5 см. Пример взят из Berge (1981)

Подробный анализ Пригожиным бенаровских ячеек показал, что, удаляясь от состояния равновесия (т. е. от состояния с равномерной температурой по всему объему жидкости), система в итоге достигает критической точки неустойчивости, в которой возникает упорядоченный гексагональный паттерн²³.

Неустойчивость в опыте Бенара представляет собой яркий пример спонтанной самоорганизации. Неравновесное состояние, поддерживаемое непрерывным потоком тепла через систему, генерирует сложный пространственный паттерн, в котором миллионы молекул движутся последовательно, формируя шестиугольные конвекционные ячейки. Более того, бенаровские ячейки не ограничены лабораторными экспериментами, они встречаются и в природе при самых разнообразных условиях. Например, поток теплого воздуха, идущий от поверхности земли вверх, может образовывать завихрения в виде шестиугольников, которые оставляют свои отпечатки на песчаных барханах в пустыне и в снежных

полях Арктики²⁴.

Еще один впечатляющий пример самоорганизации, подробно изученный Пригожиным и его коллегами в Брюсселе, представляют так называемые «химические часы». Это реакции, далекие от химического равновесия, в которых наблюдаются поразительные периодические колебания²⁵. Например, если в реакции участвует два типа молекул, «красные» и «синие», то в определенный момент весь раствор приобретает синий цвет; потом он резко меняет цвет на красный, затем снова синее, и далее это происходит с регулярными интервалами. Различные экспериментальные условия также могут вызывать волны химической активности (рис. 5-2).

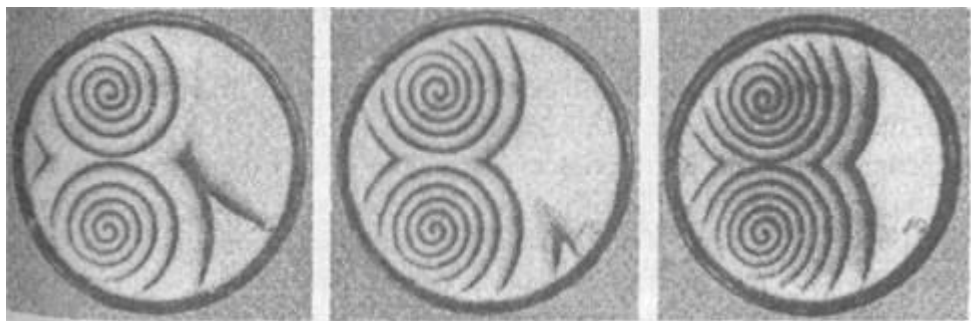


Рис. 5-2.

Волноподобная химическая активность в так называемой реакции Белоусова-Жаботинского. Взято из Prigogine (1980)

Чтобы мгновенно менять цвет, химическая система должна вести себя как целое и проявлять высокую степень упорядоченности через синхронное поведение миллиардов молекул. Пригожий и его коллеги обнаружили, что, как и при бернаровской конвекции, это синхронное поведение возникает спонтанно в далеких от равновесия критических точках неустойчивости.

В 60-е годы Пригожий разработал новую нелинейную термодинамику для описания феномена самоорганизации в далеких от равновесия открытых системах. «Классическая термодинамика, — поясняет он, — приводит к понятию *системы в состоянии равновесия*, такой, как, например, кристалл. Ячейки Бернара — это тоже структуры, но совершенно другой природы. Вот почему мы ввели понятие *диссипативных структур* — в таких ситуациях оно подчеркивает тесную связь, парадоксальную на первый взгляд, между структурой и порядком, с одной стороны, и диссипацией (рассеянием)... с другой»²⁶. В классической термодинамике рассеяние энергии при передаче тепла, при трении и т. п. всегда связывалось с потерями. Пригожинская концепция диссипативной

структуры внесла радикальные перемены в этот подход, показав, что в открытых системах рассеяние энергии становится источником порядка.

В 1967 году Пригожин впервые представил свою концепцию диссипативных структур в лекции на Нобелевском симпозиуме в Стокгольме²⁷, а четыре года спустя он опубликовал первую формулировку полной теории вместе со своим коллегой, Полом Глансдорфом²⁸. По теории Пригожина, диссипативные структуры не только поддерживают себя в далеком от равновесия устойчивом состоянии, но могут даже развиваться. Когда поток энергии и материи, пронизывающий их, нарастает, они могут пройти через новые состояния неустойчивости и трансформироваться в новые структуры повышенной сложности.

Выполненный Пригожиным подробный анализ этого поразительного феномена показал, что если диссипативные структуры получают энергию извне, то неустойчивость и скачки новых форм организации являются результатом флюктуации, усиленных петлями положительной обратной связи. Таким образом, усиливающая обратная связь «вразнос», которая всегда считалась разрушительной в кибернетике, оказывается источником нового порядка и сложности в теории диссипативных структур.

Теория лазеров

В начале 60-х, в то самое время, когда Илья Пригожий осознал критическую важность нелинейности для описания самоорганизующихся систем, родственное открытие сделал и Герман Хакен в Германии, изучая физику недавно изобретенных лазеров. В лазере при определенных специальных условиях происходит переход от обычного света лампы, состоящего из *некогерентной* (неупорядоченной) смеси световых волн различных частот и фаз, к *когерентному* лазерному свету, состоящему из однородного непрерывного монохроматического излучения.

Высокая когерентность лазерного света достигается координацией эмиссии света от отдельных атомов в лазере. Хакен понял, что эта скоординированная эмиссия, ведущая к спонтанному возникновению когерентности, или порядка, является процессом самоорганизации и что для того, чтобы верно описать его, требуется нелинейная теория. «В те дни я много спорил с несколькими американскими теоретиками, — вспоминает Хакен, — которые тоже работали над лазерами, но в рамках линейной теории. Они не понимали, что в точке перехода происходит нечто качественно новое»²⁹.

Когда был открыт лазерный феномен, его интерпретировали как процесс усиления, который Эйнштейн описал еще на заре квантовой теории. Атомы излучают свет, когда они «возбуждены», т. е. когда их электроны поднимаются на более высокие орбиты. Через некоторое время электроны спонтанно возвращаются на низшие орбиты и при этом

излучают энергию в виде элементарных световых волн. Луч обычного света состоит из неупорядоченной смеси этих элементарных волн, излучаемых атомами.

При особых условиях, однако, проходящая световая волна может «стимулировать», или, как называл это Эйнштейн, «индуцировать», возбужденный атом так, что он, излучая энергию, усиливает световую волну - Эта усиленная волна, в свою очередь, может стимулировать другой атом к ее дальнейшему усилению, и в конце концов все это приводит к лавинообразному усилению. Этот результирующий феномен был назван *усилением света через стимуляцию излучения*, откуда возникла и английская аббревиатура ЛАЗЕР.

Недостаток этого представления заключался в том, что различные атомы в лазерном материале одновременно генерируют различные *некогерентные между собой* световые лавины. Тогда каким образом, спрашивал Хакен, эти неупорядоченные волны объединяются и формируют единую последовательность когерентных волн? Ответ был найден, когда Хакен понял, что лазер представляет собой систему множества частиц, далекую от теплового равновесия³⁰. Ее необходимо «накачивать» извне, чтобы возбудить атомы, которые затем излучают энергию. Таким образом, через эту систему проходит непрерывный поток энергии.

Интенсивно изучая этот феномен в 60-е годы, Хакен обнаружил несколько параллелей с другими далекими от равновесия системами; это навело его на мысль о том, что переход от нормального света к лазерному может служить примером процесса самоорганизации, типичного для далеких от равновесия систем³¹.

Тогда Хакен ввел термин *синергетика*, чтобы выразить потребность в новой области систематического изучения процессов, в которых совместные действия отдельных частей, таких как атомы лазера, обуславливают согласованное поведение целого. В интервью, данном в 1985 году, Хакен пояснял:

В физике существует понятие «согласованные эффекты»; но оно применяется, главным образом, к системам, находящимся в тепловом равновесии... Я чувствовал, что должен ввести термин для согласованности в системах, далеких от теплового равновесия... Я хотел подчеркнуть, что нам требуется новая дисциплина для описания этих процессов... Итак, синергетику можно рассматривать как науку, имеющую дело, возможно не исключительно, с феноменом самоорганизации³².

В 1970 г. Хакен опубликовал полную версию своей нелинейной лазерной теории в престижной немецкой физической энциклопедии

«*Handbuch der Physik*»³³. Рассматривая лазер как далекую от равновесия самоорганизующуюся систему, он показал, что она входит в лазерный режим, когда интенсивность внешней накачки достигает определенной критической величины. Благодаря специальному устройству зеркал, расположенных на противоположных концах лазерного резонатора, только свет, излучаемый в направлении, близком к лазерной оси, может оставаться в резонаторе в течение времени, достаточного для возникновения процесса усиления, в то время как другие последовательности волн устраняются.

Теория Хакена с очевидностью показывает, что, хотя лазеру требуется энергетическая подкачка извне, чтобы он оставался в состоянии, далеком от равновесия, координация эмиссий осуществляется самим лазерным светом: это процесс самоорганизации. Таким образом, Хакен независимо пришел к точному описанию феномена самоорганизации, подобного тому, который Пригожин назвал бы диссипативной структурой.

Предсказания лазерной теории были подтверждены с большой точностью, и, благодаря новаторской работе Германа Хакена, лазер стал важным инструментом в изучении самоорганизации. На торжественном симпозиуме, посвященном шестидесятилетию Хакена, его сотрудник Роберт Грэм весьма выразительно оценил его работу:

Великий вклад Хакена в науку состоит в том, что он понял, что лазеры являются не только исключительно важным технологическим инструментом, но и сами по себе представляют интереснейшие физические системы, что может научить нас многому... Лазеры занимают очень важную позицию между квантовым и классическим миром, и теория Хакена объясняет нам, как могут быть связаны между собой эти миры... Лазер можно рассматривать как перекресток между квантовой и классической физикой, между равновесными и неравновесными явлениями, между фазовыми переходами и самоорганизацией, а также между регулярной и хаотической динамикой. В то же время, это система, которую мы понимаем как на микроскопическом квантовомеханическом уровне, так и на макроскопическом классическом. Это устойчивая основа для изучения общих концепций неравновесной физики³⁴.

Гиперциклы

В то время как Пригожин и Хакен изучали феномен самоорганизации, исследуя физические и химические системы, которые проходят через точки неустойчивости и образуют новые формы порядка, биохимик Манфред Эйген применил ту же концепцию, пытаясь пролить свет на тайну происхождения жизни. Согласно традиционной версии теории Дарвина, живые организмы выделились из «молекулярного хаоса»

случайно, в процессе беспорядочных мутаций и естественного отбора. Тем не менее многие ученые отмечали, что вероятность такого возникновения даже простейших клеток за обозримый период развития Земли фактически равна нулю.

Манфред Эйген, нобелевский лауреат и директор Института физической химии имени Макса Планка в Гёттингене, в начале 70-х предположил, что возникновение жизни на Земле стало возможным благодаря процессу нарастающей организации в далекой от равновесия химической системе, с образованием *гиперциклов* многочисленных петель обратной связи. Фактически Эйген постулировал добиологическую фазу эволюции, в ходе которой в молекулярном мире происходят процессы отбора, выражающие «свойства вещества в особых системах реакций»³⁵, и ввел понятие *молекулярной самоорганизации* для описания этих добиологических эволюционных процессов³⁶.

Особые системы реакций, которые изучал Эйген, известны как *каталитические циклы*. Катализатор служит веществом, которое повышает скорость химической реакции, но само при этом не изменяется. Каталитические реакции — важнейшие процессы в химии жизни. Наиболее распространенными и эффективными катализаторами являются ферменты, или энзимы, — существенные компоненты клеток, способствующие жизненно важным метаболическим процессам.

Когда Эйген и его коллеги в 60-е годы изучали каталитические реакции с участием ферментов, они заметили, что в далеких от равновесия биохимических системах, т. е. системах, пронизанных энергетическими потоками, различные каталитические реакции объединяются, формируя сложные сети, в которых могут содержаться и замкнутые циклы. На рис. 5-3 приведен пример такой каталитической сети, когда 15 ферментов ускоряют формирование друг друга таким образом, что образуется замкнутый, или каталитический, цикл.

Эти каталитические циклы лежат в основе самоорганизующихся химических систем, подобных химическим часам, исследованным Пригожиным; кроме того, они играют существенную роль в метаболических функциях живых организмов. Они замечательным образом устойчивы и выдерживают широкий диапазон условий³⁸. Эйген установил, что в условиях достаточного времени и непрерывного потока энергии каталитические циклы обнаруживают тенденцию к сцеплению, формируя замкнутые петли, в которых ферменты, созданные в одном цикле, служат катализаторами в последующем цикле. Он ввел термин «гиперциклы» для тех петель, в которых каждый узел представляет собой каталитический цикл.

Оказывается, что гиперциклы проявляют не только замечательную

устойчивость, но также и способность к самовоспроизведению и коррекции ошибок при воспроизведении. А это означает, что они могут хранить и передавать сложную информацию. Теория Эйгена показывает, что такое самовоспроизведение — конечно, хорошо известное в мире живых организмов — могло происходить в химических системах задолго до появления жизни, до образования генетической структуры. Химические гиперциклы, таким образом, являются самоорганизующимися системами, которые, строго говоря, нельзя назвать «живыми», поскольку у них отсутствуют некоторые ключевые характеристики жизни. Тем не менее их можно рассматривать в качестве прототипов живых систем. Урок, который можно извлечь из этого, по-видимому, заключается в том, что *корни жизни берут начало в мире неживой материи*.

Одно из наиболее поразительных «жизнеподобных» свойств гиперциклов состоит в том, что они могут развиваться, проходя через периоды неустойчивости и последовательно создавая все более высокие уровни организации, которые характеризуются нарастающим разнообразием и богатством компонентов и структур³⁸.

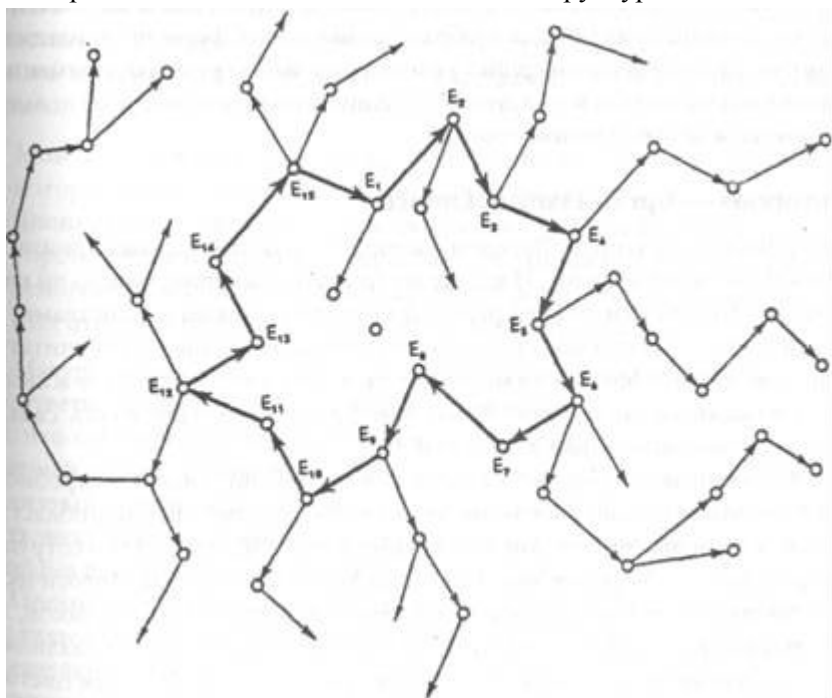


Рис. 5-3.

Каталитическая сеть ферментов, включающая замкнутый цикл (E1 — E15). Из Eigen (1971)

Эйген отмечает, что новые гиперциклы, сформированные подобным

образом, вполне могут составить конкуренцию естественному отбору, и, описывая весь процесс, он явным образом ссылается на теорию Пригожина: «Возникновение мутаций с преимуществами отбора соответствует определенной неустойчивости, которую можно объяснить с помощью теории... Пригожина и Гландорфа»³⁹.

Теория гиперциклов Маифреда Эйгена содержит те же основные концепции самоорганизации, что и теория диссипативных структур Ильи Пригожина и теория лазеров Германа Хакена, а именно: состояние системы, далекое от равновесия; развитие усилительных процессов через петли положительной обратной связи; возникновение неустойчивых состояний, приводящих к образованию новых форм организации. Помимо этого, Эйген совершил революционный переворот, применив дарвиновский подход к описанию эволюционных феноменов на добиологическом, молекулярном уровне.

Автопоэз — организация живого

Гиперциклы, изученные Эйгеном, самоорганизуются, самовоспроизводятся и эволюционируют. И все же возникают сомнения, можно ли назвать эти циклы химических реакций «живыми». Какими свойствами, в таком случае, должна обладать система, чтобы ее можно было считать воистину живой? Можем ли мы провести четкое различие между живыми и неживыми системами? В чем конкретно заключается суть связи между самоорганизацией и жизнью?

Именно эти вопросы в 60-е годы задавал себе чилийский нейробиолог Умберто Матурана. После шести лет учебы и исследований в области биологии, проведенных в Англии и Соединенных Штатах, где он сотрудничал с группой Уоррена Мак-Каллока в Массачусетском технологическом институте и находился под сильным влиянием кибернетиков, в 1960 г. Матурана вернулся в Университет Сантьяго. Там он специализировался в нейробиологии и, в частности, занимался проблемами цветовосприятия.

В результате этих исследований у Матураны выкристаллизовались два основных вопроса. Он вспоминал позже: «Я попал в ситуацию, когда моя академическая жизнь разделилась — я искал ответы на два вопроса, которые, казалось, ведут в противоположные стороны: Что представляет собой организация живого? Что такое феномен восприятия?»⁴⁰.

Почти десять лет Матурана бился над этими вопросами, и его гениальность выразилась в том, что он сумел дать единый ответ на оба. Тем самым он открыл возможность объединить две традиции системного мышления, которые сосредоточились на противоположных сторонах картезианского разделения. Организменные биологи исследовали природу биологической формы, а кибернетики пытались понять природу разума. В

конце шестидесятых Матурана осознал, что разгадка обеих этих головоломок лежит в понимании «организации живого».

Осенью 1968 г. Хайнц фон Форстер пригласил Матурану принять участие в работе его междисциплинарной исследовательской группы в Университете Иллинойса, а позже стать участником чикагского симпозиума по обучению. Это была для Матураны идеальная возможность представить свои идеи об обучении как биологическом феномене⁴¹. В чем же состояло основное открытие Матураны? По его собственным словам:

Мои исследования цветовосприятия привели меня к открытию, которое было чрезвычайно важно для меня: нервная система функционирует как замкнутая сеть интеракций (взаимодействий), в которой каждое изменение интерактивных отношений между определенными компонентами всегда приводит к изменению интерактивных отношений в тех же или в других компонентах⁴².

Матурана вывел из своего открытия два заключения, которые и дали ему ответы на два его главных вопроса. Он сформулировал гипотезу о том, что *круговая организация* нервной системы является базовой организацией для всех живых систем: «Живые системы... организованы в замкнутый причинный круговой процесс, что обеспечивает возможность эволюционных изменений способа поддержания кругообразности, но без потери при этом самой кругообразности»⁴³.

Поскольку все изменения в системе происходят в рамках этой базовой кругообразности, утверждает Матурана, то компоненты, которые определяют данную круговую организацию, должны формироваться и Поддерживаться ею же. И он делает заключение, что такой сетевой паттерн, в котором функция каждого компонента состоит в том, чтобы помочь произвести и трансформировать другие компоненты, одновременно поддерживая общую кругообразность сети, и является *основной организацией живого*.

Второе заключение, которое Матурана вывел из круговой замкнутости нервной системы, привело к радикально новому пониманию обучения. Он постулировал, что нервная система не только *сама организуется*, но и постоянно *сама на себя ссылается*, поэтому восприятие не может рассматриваться как представление внешней реальности, но должно быть понято как непрерывное создание новых взаимоотношений внутри нейронной сети: «Деятельность нервных клеток не отражает окружающую среду, независимую от живого организма, и, следовательно, не позволяет конструировать абсолютно существующий внешний мир»⁴⁴.

Согласно Матуране, восприятие, а в более общем смысле познание, не *представляет* внешнюю реальность, а скорее *определяет* [specify] через процесс круговой организации нервной системы. На основе этой

предпосылки Матурана затем делает важный шаг, утверждая, что процесс круговой организации как таковой — связанный или не связанный с нервной системой — идентичен процессу познания:

Живые системы — это когнитивные системы, а жизнь — процесс познания. Это утверждение справедливо для всех организмов, с нервной системой или без нее⁴⁵.

Такой способ идентификации познания с процессом самой жизни — действительно радикально новая концепция. Ее многообещающие следствия будут подробно обсуждены ниже⁴⁶.

Опубликовав свои идеи в 1970 г., Матурана начал длительную совместную работу с Франциско Варелой, молодым нейробиологом из университета в Сантьяго. Варела был студентом Матураны, прежде чем стал его сотрудником. По свидетельству Матураны, сотрудничество началось тогда, когда Варела в частной беседе бросил вызов мэтру, предложив ему найти более формальное и более полное описание концепции круговой организации⁴⁷. Они немедленно принялись за работу над полным словесным описанием идеи Матураны, отложив попытки создать математическую модель, и начали они с изобретения названия для нее — *автопоэз*.

Авто-, конечно, означает «само-» и относится к автономии самоорганизующихся систем; а *поэз* имеет тот же греческий корень, что и «поэзия», и означает «созидание». Итак, *автопоэз* означает «самосозидание».

Поскольку они изобрели новое слово, не имеющее предыдущей истории, его было удобно использовать как отличительный технический термин именно для организации живых систем. Два года спустя Матурана и Варела опубликовали свое первое описание автопоэза в объемном эссе⁴⁸, а к 1974 г. они вместе со своим коллегой Рикардо Урибе разработали соответствующую математическую модель для простейшей системы автопоэза, живой клетки⁴⁹.

Матурана и Варела начинают эссе об автопоэзе с того, что определяют свой подход как «механистический» — чтобы отмежевать его от виталистических подходов к природе жизни: «Наш подход будет механистическим: никакие силы или принципы, не присутствующие в физической вселенной, не будут привлечены». Однако следующее же предложение сразу отчетливо показывает, что авторы не картезианские механицисты, но системные философы:

И все же наша проблема — живая организация, поэтому наши интересы будут лежать не в области свойств компонентов, но в сфере процессов и связей между процессами, которые осуществляются через компоненты⁵⁰.

Далее они уточняют свою позицию, вводя важное различие между *организацией* и *структурой*; это различие подразумевалось в течение всей истории системного мышления, но в явном виде к нему не обращались, пока не началось развитие кибернетики⁵¹. Матурана и Варела делают различие кристально чистым. Организация живой системы, как они поясняют, представляет собой набор связей между ее компонентами, который определяет принадлежность системы к определенному классу (например, бактериям, подсолнечникам, кошкам или человеческому мозгу). Описание такой организации — это абстрактное описание взаимоотношений, оно не определяет компоненты. Авторы предполагают, что *автопоэз* — это всеобщий паттерн организации, одинаковый для всех живых систем, независимо от природы их компонентов.

Структура живых систем, наоборот, складывается из реальных отношений между физическими компонентами. Другими словами, структура системы представляет собой физическое воплощение ее организации. Матурана и Варела подчеркивают, что организация системы не зависит от свойств ее компонентов, так что данная организация может быть воплощена множеством разных способов на основе множества разных типов компонентов.

Подчеркнув, что их интересует организация, а не структура, авторы продолжают далее определять автопоэз как организацию, общую для всех живых систем. Это сеть процессов производства, в которой функция каждого компонента состоит в том, чтобы участвовать в производстве или трансформации других компонентов сети. Таким образом, вся сеть непрерывно «делает себя». Она производится своими компонентами и, в свою очередь, производит эти компоненты. «В живой системе, — поясняют авторы, — продуктом ее функционирования является ее же организация»⁵².

Важная особенность живых систем заключается в том, что их автопоэзная организация включает создание границы, которая обозначает сферу операций сети и определяет систему как единое целое. Авторы указывают, что каталитические циклы, в частности, не образуют живых систем, поскольку их граница предопределяется факторами (например, физическим сосудом), не зависящими от каталитических процессов.

Интересно отметить, что примерно за десять лет до того, как Матурана впервые опубликовал свои идеи, физик Джеффри Чу сформулировал свою так называемую «гипотезу бутстрапа», касающуюся состава и взаимодействия субатомных частиц, — она звучит почти так же, как концепция автопоэза⁵³. Согласно Чу, сильно взаимодействующие частицы, или *адроны*, формируют сеть взаимодействий, в которой «каждая частица помогает генерировать другие частицы, которые, в свою очередь,

генерируют ее»⁵⁴.

Тем не менее, существует два кардинальных различия между адронным бутстрапом и автопоэзом. Адроны являются потенциальными *пограничными состояниями* друг друга в вероятностном смысле квантовой теории, что неприложимо к *организации живого*. Более того, сеть субатомных частиц, взаимодействующих через высокоэнергетические столкновения, не может быть признана автопоэзной, поскольку она не образует никакой границы.

Согласно Матуране и Вареле, концепция автопоэза необходима и достаточна для характеристики организации живых систем. Однако эта характеристика не содержит никакой информации о физическом составе компонентов системы. Для понимания свойств компонентов и их физических взаимодействий абстрактное описание организации системы должно быть дополнено описанием структуры системы на языке физики и химии. Ясное различение этих двух описаний — одного в терминах структуры и другого в терминах организации — позволяет объединить структуро-ориентированные модели самоорганизации (например, Пригожина и Хакена) и организационно-ориентированные модели (например, Эйгена и Матураны-Варелы) в согласованную теорию живых систем⁵⁵.

Гайя — живая Земля

Ключевые идеи, лежащие в основе описанных выше разнообразных моделей самоорганизующихся систем, выкристаллизовались в течение нескольких лет в начале 60-х: в Соединенных Штатах Хайнц фон Форстер собрал свою междисциплинарную исследовательскую группу и проводил конференции по самоорганизации; в Бельгии Илья Пригожий осознал принципиальную связь между неравновесными системами и нелинейностью; в Германии Герман Хакен разработал теорию лазера, а Манфред Эйген исследовал каталитические циклы; в Чили Умберто Матурана бился над разгадкой организации живых систем.

В это же время специалист по химии атмосферы Джеймс Лавлок пришел к блестящей догадке, а затем и к формулированию модели, которая, вероятно, является наиболее поразительным и красивым выражением самоорганизации: планета Земля как целое представляет собой живую, самоорганизующуюся систему.

Истоки смелой гипотезы Лавлока можно отыскать в самых первых этапах космической программы НАСА. Хотя идея живой Земли существовала еще в древности и умозрительные теории о планете как живой системе формулировались неоднократно⁵⁶, только первые космические полеты в начале 60-х позволили человеческим существам впервые реально взглянуть на свою планету со стороны и воспринять ее

как единое Целое. Вид Земли во всей ее красе — бело-голубой шар, парящий на фоне глубокой тьмы космоса, — произвел сильнейшее впечатление на космонавтов, и впоследствии они рассказывали, что это событие стало для них великим духовным опытом, который навсегда изменил их отношение к Земле⁵⁷. Изумительные фотографии, с которыми они вернулись Назад, стали могучим символом глобального экологического движения.

В то время как космонавты наблюдали планету и восхищались ее красотой, датчики научных приборов изучали из открытого космоса окружающую среду Земли, Луны и других близлежащих планет. В 60-е годы в рамках советских и американских космических программ было запущено более 50 космических спутников, большинство из которых исследовали Луну, но некоторые направлялись и дальше, к Венере и Марсу.

В это время НАСА пригласила Джеймса Лавлока в Лабораторию реактивных двигателей в Пасадене, Калифорния, с тем, чтобы он принял участие в разработке приборов для обнаружения жизни на Марсе⁵⁸. План НАСА состоял в том, чтобы послать на Марс космический корабль, который искал бы следы жизни в районе посадки, экспериментально исследуя марсианскую почву. Работая над техническими проблемами конструкции прибора, Лавлок задавал себе более общий вопрос: «Как мы можем быть уверены в том, что марсианская жизнь, если она там есть, проявится в ответ на тесты, основанные на земном варианте жизни?» В последующие месяцы и годы этот вопрос не покидал его и заставлял глубоко задумываться над природой жизни и способами ее распознавания.

Размышляя над этой проблемой, Лавлок обнаружил, что тот факт, что все живые организмы поглощают энергию и материю и освобождаются от отработанных продуктов, являет собой наиболее обобщенный признак жизни среди всех ему известных. Почти как Пригожий, он подумал, что эту кардинальную характеристику можно выразить математически, на языке энтропии; но затем его рассуждения приняли другое направление. Лавлок предположил, что жизнь на любой планете использовала бы атмосферу и океаны в качестве текучей среды для сырья и отходов. Поэтому, размышлял он, существует некая возможность обнаружить наличие жизни, проанализировав химический состав атмосферы планеты. Таким образом, если на Марсе есть жизнь, то в марсианской атмосфере должна существовать некая особая комбинация газов, некоторый характерный «узор», который можно обнаружить даже с Земли.

Потрясающее подтверждение этих соображений пришло, когда Лавлок и его коллега Даен Хичкок начали систематический анализ марсианской атмосферы, используя результаты наблюдений с поверхности Земли и

сравнивая их с аналогичными данными для земной атмосферы. Они обнаружили, что химический состав двух этих атмосфер принципиально различен. В то время как в марсианской атмосфере очень мало кислорода, огромные количества углекислого газа (CO_2) и совсем нет метана, атмосфера Земли содержит массу кислорода, мизерные объемы CO_2 и много метана.

Лавлок понял, что причина этого специфического атмосферного профиля Марса кроется в том, что на планете, где нет жизни, все возможные химические реакции между газами в атмосфере завершились в очень давние времена. Сегодня никакие химические реакции на Марсе невозможны: в марсианской атмосфере наблюдается полное химическое равновесие.

Ситуация на Земле совершенно противоположная. Земная атмосфера содержит такие газы, как кислород и метан, которые с большой вероятностью вступают в реакцию, но и сосуществуют в больших пропорциях — получается смесь газов, далекая от химического равновесия. Лавлок понял, что это особое состояние должно быть обусловлено присутствием жизни на Земле. Растения непрерывно производят кислород, а другие организмы — другие газы, так что объем атмосферных газов постоянно пополняется по мере движения химических реакций. Другими словами, Лавлок обнаружил, что атмосфера Земли является далекой от равновесия открытой системой с непрерывным потоком энергии и материи. Его химический анализ позволил определить отличительный признак жизни.

Это прозрение пришло к Лавлоку так внезапно, что он навсегда запомнил точный момент его рождения:

Откровение Гайи пришло ко мне совершенно внезапно — как вспышка просветления. Я находился в маленькой комнате на верхнем этаже здания Лаборатории реактивных двигателей в Пасадене, Калифорния. Это была осень 1965 года... и я обсуждал с коллегой Даеном Хичкоком статью, которую мы вместе готовили... Именно в этот момент я узрел Гайю. Мне в голову пришла потрясающая мысль. Атмосфера Земли представляет собой необычную и неустойчивую смесь газов. Вместе с тем я знал, что ее состав не менялся в течение огромного периода времени. А что если Земля не только сформировала атмосферу, но также и регулировала ее — поддерживая ее постоянный состав, и именно на том уровне, который благоприятен для организмов?⁵⁹

Процесс саморегуляции является ключевым в идее Лавлока. Из астрофизики он знал, что, с тех пор как на Земле зародилась жизнь, тепловое излучение Солнца повысилось на 25% и что, несмотря на это

увеличение, температура поверхности Земли оставалась неизменной на уровне благоприятном для жизни, в течение этих четырех миллиардов лет. Что если Земля способна регулировать свою температуру и другие планетарные параметры — состав атмосферы, уровень солености океанов и т.д. — точно так же как живые организмы способны к саморегуляции и поддержанию постоянной температуры и других параметров своего тела? Лавлок понял, что эта гипотеза ведет к разрыву с традиционной наукой:

Рассматривайте теорию Гайи как альтернативу общепринятой мудрости, которая видит в Земле мертвую планету, состоящую из неодушевленных камней, океана и атмосферы и лишь местами населенную крупными формами жизни. Рассматривайте Гайю как реальную систему, в которой вся жизнь в целом и вся окружающая ее среда накрепко связаны воедино и представляют собой саморегулирующуюся сущность⁶⁰.

Ученым НАСА открытие Лавлока отнюдь не пришлось по душе. Они разработали впечатляющий цикл экспериментов по обнаружению жизни и связывали его с миссией своего «Викинга» на Марс, а теперь Лавлок рассказывает им, что на самом деле нет никакой необходимости запускать космический корабль на красную планету. Все, что им нужно, — это спектральный анализ марсианской атмосферы, который легко произвести с помощью телескопа с Земли. Неудивительно, что НАСА игнорировала совет Лавлока и продолжала разрабатывать программу «Викинг». Их корабль достиг Марса несколько лет спустя и, как и предсказывал Лавлок, не обнаружил там следов жизни.

В 1969 году Лавлок впервые представил свою гипотезу Земли как саморегулирующейся системы на научном семинаре в Принстоне⁶¹. Вскоре после этого его друг, писатель, понимая, что идея Лавлока возрождает мощный древний миф, предложил название *Гайя-гипотеза* в честь греческой богини Земли. Лавлок с радостью принял предложение и в 1972 году опубликовал первую обширную версию своей идеи в статье под названием «*Гайя: взгляд сквозь атмосферу*»⁶².

В те времена Лавлок еще не имел представления о том, *каким образом* Земля может регулировать температуру и состав своей атмосферы. Он понимал только, что в саморегулирующие процессы должны быть вовлечены организмы, населяющие биосферу. Он не знал, какие газы производят те или иные организмы. Но в это же самое время американский микробиолог Линн Маргулис изучала именно те процессы, которые Лавлоку было необходимо понять, — производство и удаление газов различными организмами, включая, в частности, мириады бактерий в почве Земли. Маргулис вспоминает, как ее неотступно преследовал вопрос: «Почему все согласны с тем, что атмосферный кислород...

происходит от жизненных процессов, но никто не говорит о других атмосферных газах, исходящих от жизни?»⁶³ Вскоре некоторые из ее коллег посоветовали ей поговорить с Джеймсом Лавлоком; с этого началось долгое и плодотворное сотрудничество, которое вылилось в полновесную научную Гайя-гипотезу.

Оказалось, что научные убеждения и профессиональные сферы интересов Джеймса Лавлока и Линн Маргулис идеально дополняют друг друга. Маргулис без затруднений отвечала на многочисленные вопросы Лавлока по поводу биологического происхождения атмосферных газов, в то время как Лавлок вносил в зарождающуюся теорию Гайи концепции из химии, термодинамики и кибернетики. Таким образом двое ученых постепенно смогли определить сложную сеть петель обратной связи, которая — как они предполагали — осуществляет саморегуляцию планетарной системы.

Выдающаяся особенность этих петель обратной связи заключается в том, что они связывают воедино живые и неживые системы. Мы теперь уже не можем думать о камнях, животных и растениях как об изолированных сущностях. Теория Гайи показывает, что существует тесная взаимосвязь между живыми частями планеты — растениями, микроорганизмами и животными — и ее неживыми составляющими — камнями, океанами и атмосферой.

Цикл углекислого газа хорошо иллюстрирует это положение⁶⁴. В течение миллионов лет вулканы Земли извергли в атмосферу колоссальные массы углекислого газа (CO_2). Поскольку CO_2 — один из важнейших газов, создающих тепличный эффект, Гайе приходится выкачивать его из атмосферы, иначе температура для жизни будет слишком высокой. Растения и животные перерабатывают огромные количества CO_2 в ходе процессов фотосинтеза, дыхания и разложения. Тем не менее эти обмены всегда сбалансированы и не влияют на уровень CO_2 в атмосфере. Согласно теории Гайи, избыток углекислого газа в атмосфере удаляется и перерабатывается гигантской петлей обратной связи, в которую в качестве важнейшей составляющей входит эрозия горных пород.

В процессе эрозии компоненты горных пород соединяются с дождевой водой и углекислым газом, формируя различные химические соединения, именуемые карбонатами (углекислыми солями). Благодаря этому CO_2 изымается из атмосферы и связывается в жидких растворах. Это чисто химические процессы, не требующие участия жизни. Тем не менее Лавлок и другие обнаружили, что присутствие почвенных бактерий значительно ускоряет эрозию пород. В определенном смысле почвенные бактерии действуют как катализатор процесса эрозии, и весь цикл обращения

углекислого газа можно рассматривать как биологический эквивалент каталитических циклов, изученных Манфредом Эйгеном.

Затем карбонаты смываются в океан, где крошечные водоросли, невидимые невооруженным глазом, поглощают их и используют для построения изящных меловых (карбонат кальция) раковин. Итак, CO_2 , который был в атмосфере, теперь оказывается в раковинах этих мельчайших водорослей (рис. 5-4). Кроме того, океанические водоросли поглощают углекислый газ и непосредственно из воздуха.

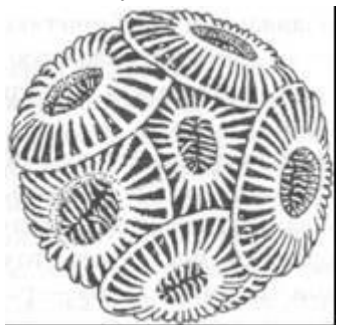


Рис. 5-4. Океаническая водоросль (кокколитофора) с меловой раковинной

Когда водоросли умирают, их раковины оседают на океанское дно, где образуют массивные отложения известняка (другой формы карбоната кальция). Обладая громадным весом, эти известняковые отложения постепенно погружаются в мантию Земли и плавятся, порой даже вызывая сдвиги тектонических пластов. В конце концов некоторая часть CO_2 , содержащаяся в расплавленной породе, снова извергается вулканами наружу и запускает следующий оборот великого цикла Гайи.

Весь цикл — связь вулканов с эрозией пород, с почвенными бактериями, с океаническими водорослями, с известняковыми отложениями и снова с вулканами — работает как гигантская петля обратной связи, участвующая в регулировании температуры Земли. Чем интенсивнее солнечное излучение, тем активнее становятся бактерии почвы и выше скорость эрозии пород. Это, в свою очередь, выкачивает больше CO_2 из атмосферы и, таким образом, охлаждает планету. Согласно Лавлоку и Маргулис, подобные циклы обратной связи — связывающие друг с другом растения и камни, животных и атмосферные газы, микроорганизмы и океаны — регулируют климат Земли, содержание соли в ее океанах и другие важные планетарные условия.

Теория Гайи рассматривает жизнь в системном контексте, сопрягая вместе геологию, микробиологию, химию атмосферы и другие дисциплины, специалисты которых не привыкли взаимодействовать друг с другом. Лавлок и Маргулис бросили вызов общепринятому убеждению,

что это изолированные дисциплины, что условия для жизни на Земле создаются геологическими силами и что растения и животные — просто пассажиры, которым случайно удалось найти подходящие условия для своей эволюции. По Гайя теории, жизнь создает условия для собственного существования. Линн Маргулис говорит об этом так:

Выражаясь простым языком, эта гипотеза [Гайи] говорит о том, что поверхность Земли, которую мы всегда считали окружающей средой, на самом деле является частью жизни. Воздушный покров — тропосферу — следует считать круговой системой, которую формирует и поддерживает сама жизнь... Когда ученые говорят нам, что жизнь приспосабливается, по сути, к пассивному окружению химии, физики и камней, они укрепляют сильно искаженный взгляд на природу. Жизнь на самом деле производит, формирует и изменяет то окружение, к которому она приспосабливается. В таком случае, это «окружение» оказывает обратную связь на жизнь, которая изменяется, действует и растет в нем. Происходят непрерывные циклические взаимодействия⁶⁵.

Поначалу неприятие научным сообществом этого нового взгляда на жизнь было столь сильным, что авторы даже не могли опубликовать свою гипотезу. Авторитетные академические журналы, такие как «*Science*» и «*Nature*», отвергли ее. В конце концов астроном Карл Саган, который издавал «*Icarus*», предложил Лавлоку и Маргулис опубликовать их гипотезу в своем журнале⁶⁶. Поражает тот факт, что ни одна из теорий и Моделей самоорганизации, предложенных к тому времени, не встречала такого сильного сопротивления. Это наводит на размышление о том, не была ли эта в высшей степени иррациональная реакция научного истеблишмента обусловлена влиянием Гайи как мощного архетипического мифа.

Действительно, образ Гайи как чувствующего существа был одним из главных неявных аргументов против Гайя-гипотезы после ее публикации. Ученые выражали свое неприятие заявлениями, что гипотеза ненаучна, поскольку она телеологична, т. е. подразумевает идею целенаправленного формирования естественных процессов. «Ни Линн Маргулис, ни я сам никогда не говорили, что планетарная саморегуляция целенаправленна, — протестует Лавлок. — И все же мы столкнулись с настойчивой, почти догматической критикой нашей теории как телеологической концепции»⁶⁷.

Эта критика уходит корнями в старые споры между механицистами и виталистами. В то время как механицисты утверждают, что все биологические феномены будут в конце концов объяснены в рамках законов физики и химии, виталисты постулируют существование нематериальной сущности, каузального посредника, управляющего

жизненными процессами, которые не поддаются механистическому объяснению⁶⁸. Телеология — от греческого *tellos* («причина») — утверждает, что каузальный посредник, признаваемый витализмом, целенаправлен, что в природе существует цель и замысел. Упорно противостоя виталистам и их телеологическим аргументам, механицисты до сих пор сражаются с ньютоновской метафорой Бога как часового мастера. Недавно зародившаяся теория живых систем положила конец спорам между механицизмом и телеологией. Как мы увидим ниже, она рассматривает живую природу как сущность, наделенную интеллектом и разумом, и не нуждается в признании какого-либо высшего замысла или причины⁶⁹.

Представители механистической биологии атаковали гипотезу Гайи как телеологическую концепцию, потому что они не могли представить, как жизнь на Земле может создавать и регулировать условия для своего собственного существования, не обладая сознанием и способностью к целеполаганию. «Не проводятся ли собрания комитетов различных биологических видов, чтобы обсудить температуру на будущий год?» — со злорадным юмором вопрошали эти критики⁷⁰.

Лавлок ответил на критику невинной математической моделью под названием «Мир маргариток». Она представляет весьма упрощенную схему Гайи, из которой становится совершенно понятно, что регулирование температуры — это *внезапно возникающее* свойство системы, которое проявляется автоматически в отсутствие какого бы то ни было целенаправленного действия, как следствие наличия петель обратной связи между организмами планеты и их окружением⁷¹.

«Мир маргариток» — это компьютерная модель планеты, согреваемой солнцем с постоянно нарастающим излучением тепла и населенной только двумя видами — черными и белыми маргаритками. Семена этих маргариток рассеяны по всей планете, почва всюду влажна и плодородна, однако маргаритки могут расти лишь в определенном температурном интервале.

Лавлок ввел математические уравнения, соответствующие всем этим условиям, в качестве начальной выбрал температуру замерзания — и запустил модель на компьютере. «Приведет ли эволюция экосистемы мира маргариток к саморегуляции климата?» — таков был решающий вопрос, который он задал сам себе.

Результаты оказались впечатляющими. Планета постепенно разогревается, и в какой-то момент экватор становится достаточно теплым для поддержания жизни растений. Первыми появляются черные маргаритки, поскольку они поглощают тепло лучше белых и поэтому более приспособлены к выживанию и воспроизведению. Итак, в первой

фазе эволюции в мире маргариток появляется пояс черных маргариток, распределенных вдоль экватора (рис. 5-5).

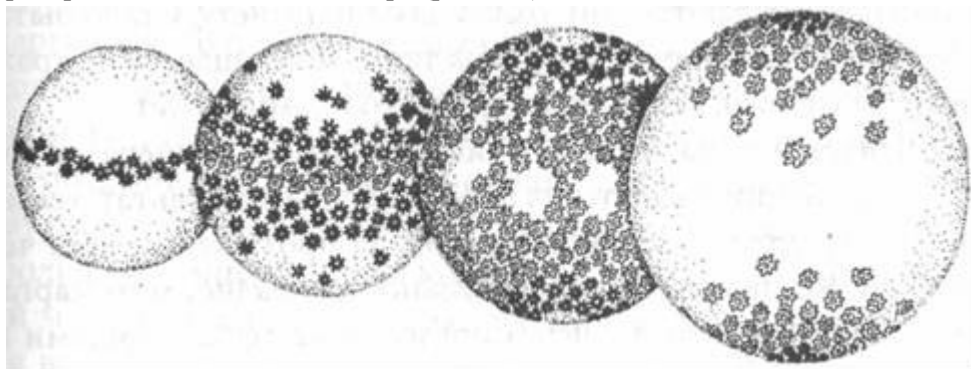


Рис. 5-5. Четыре эволюционные фазы мира маргариток

По мере дальнейшего повышения температуры на планете экватор становится слишком жарким для выживания черных маргариток, и они начинают колонизацию субтропических зон. В это же время в районе экватора появляются белые маргаритки. Поскольку они белые, они отражают тепло и охлаждаются, что повышает их выживаемость в Перегретых зонах по сравнению с черными маргаритками. Итак, во второй фазе вдоль экватора наблюдается пояс белых маргариток, а субтропические зоны и области умеренного климата заполнены черными маргаритками; вблизи полюсов еще слишком холодно для любого вида маргариток.

Солнце продолжает греть с возрастающей интенсивностью, и растительная жизнь на экваторе вымирает — там становится слишком жарко даже для белых маргариток. Тем временем белые маргаритки сменили черные в умеренных зонах, а черные маргаритки начинают появляться вокруг полюсов. Таким образом, в третьей фазе экватор оказывается бесплодным, умеренные зоны заселены белыми маргаритками, вокруг полярных зон теснятся черные маргаритки, и лишь на самых верхушках полюсов не наблюдается растительной жизни. В последней фазе, наконец, обширные территории вокруг экватора и субтропические зоны оказываются слишком горячими для выживания обоих видов, и мы видим белые маргаритки в умеренных зонах, а черные — на полюсах. После этого на модели планеты становится слишком жарко для выживания обоих видов маргариток, и жизнь на ней вымирает.

Такова основная динамика системы мира маргариток. Важнейшее свойство модели, обусловленное саморегулированием, заключается в том, что черные маргаритки, поглощая тепло, согревают не только себя, но и саму планету. Подобным же образом, когда белые маргаритки отражают

тепло и охлаждаются, они охлаждают и планету. Стало быть, в течение всей эволюции мира маргариток тепло поглощается и отражается в зависимости от того, какой вид маргариток доминирует.

Когда Лавлок изобразил на графике изменения температуры планеты в ходе ее эволюции, он получил поразительный результат: температура планеты поддерживается постоянной на протяжении всех четырех фаз (рис. 5-6). Когда солнце относительно прохладно, мир маргариток повышает свою температуру через поглощение тепла черными маргаритками; по мере того как солнце нагревается, температура постепенно снижается из-за прогрессирующего преобладания белых маргариток, отражающих тепло. Так мир маргариток, без всякого предвидения и планирования, «регулирует свою температуру в обширном диапазоне лишь с помощью *танца маргариток*»⁷².

Петли обратной связи, которые регулируют влияние окружающей среды на рост маргариток, который, в свою очередь, влияет на окружение, представляют собой существенную особенность модели Мира маргариток. Если этот цикл разорвать так, чтобы маргаритки перестали влиять на окружающую среду, популяции маргариток начинают сильно и беспорядочно колебаться и вся система приходит в хаотическое состояние. Но как только петли замыкаются, снова связывая маргаритки с окружающей средой, модель стабилизируется и возникает саморегуляция.

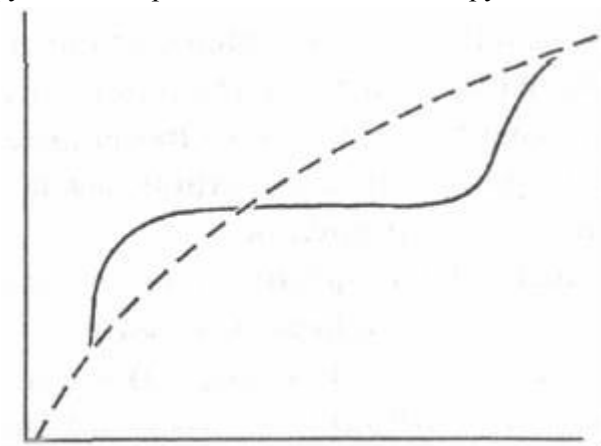


Рис. 5-6.

Эволюция температуры в мире маргариток: пунктирная кривая показывает рост

температуры в отсутствии жизни; непрерывная кривая показывает, как жизнь

поддерживает постоянную температуру. График взят из Lovelock (1991)

С тех пор Лавлок разработал несколько гораздо более сложных версий

мира маргариток. В новых моделях присутствуют не два, а гораздо больше видов маргариток с различной пигментацией; существуют модели, в которых маргаритки развиваются и изменяют цвет, модели, в которых кролики поедают маргаритки, а лисы поедают кроликов, и т. д.⁷³. Конечный результат анализа всех этих весьма сложных моделей состоит в том, что небольшие температурные колебания, присутствующие в первоначальной модели мира маргариток, сглаживаются и саморегуляция становится все более и более устойчивой по мере возрастания сложности модели. Кроме того, Лавлок ввел в свои модели катастрофы, которые с регулярными интервалами уничтожают 30% маргариток. Он обнаружил, что саморегуляция мира маргариток обнаруживает замечательную гибкость и при этих резких возмущениях.

Все эти модели вызвали оживленную дискуссию среди биологов, геофизиков и геохимиков, и с тех пор, как они были впервые опубликованы, стала вызывать больше уважения в научном сообществе и Гайя- гипотеза. Сегодня уже в разных частях света существует несколько исследовательских групп, которые работают над подробными формулировками Гайя-теории⁷⁴.

Первые попытки синтеза

В конце 70-х, почти двадцать лет спустя после того, как в различных контекстах были обнаружены ключевые критерии самоорганизации, удалось сформулировать подробные математические теории и модели самоорганизующихся систем и стал очевиден набор присущих им характеристик: непрерывный поток энергии и материи через систему, далекое от равновесия устойчивое состояние, возникновение новых паттернов порядка, центральная роль петель обратной связи и математическое описание в виде нелинейных уравнений.

В это же время австрийский физик Эрих Янч, работавший тогда в Калифорнийском университете в Беркли, в своей книге *«Самоорганизующаяся Вселенная»* представил одну из первых попыток синтеза новых моделей самоорганизации, основанную, главным образом, на теории диссипативных структур Пригожина⁷⁵. И хотя сегодня книга Янча уже устарела, поскольку была написана прежде, чем широкую известность приобрела математика сложных систем, и не включала полную концепцию автопоэза как организации живых систем, в то время она представляла собой огромную ценность. Это была первая книга, сделавшая труды Пригожина доступными для широкой публики, и в ней была предпринята попытка объединить самые новые (на тот момент) концепции и идеи в связную парадигму самоорганизации. Мой синтез этих концепций в настоящей книге является в некоторой мере попыткой переформулировать ранние работы Эриха Янча.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 5

1. См. Checkland (1981), pp. 123ff.
2. См. там же, p. 129.
3. См. Dickson (1971).
4. Цитируется по Checkland (1981), p. 137.
5. См. там же.
6. См. Richardson (1992), pp. 149ff, 170ff.
7. Ulrich (1984).
8. См. Königswieser и Lutz (1992).
9. См. Сагра (1982), p. 116ff.
10. Lilienfeld (1978), pp. 191-2.
11. См. ниже, с 140— 142.
12. См. выше, с. 34— 35.
13. См. выше, с. 53.
14. См. ниже, с. 179 и далее.
15. См. Varela et al. (1992), p. 94.
16. См. выше, с. 73 и далее.
17. McCulloch и Pitts (1943).
18. См., например, Ashby (1947).
19. См. Yovits and Cameron (1959), Foerster and Zopf (1962); Yovits, Jacobi and Goldstein (1962).
20. Математическое выражение избыточности имеет вид $R = 1 - H/H_{\max}$ где H — энтропия системы в данный момент, а $H_{\max}$ — максимально возможная энтропия для этой системы.
21. Подробный обзор истории этих исследовательских проектов см. в Paslack (1991).
22. Цитируется там же, p. 97п.
23. См. Prigogine and Stengers (1984), p. 142.
24. См. Laszlo (1987), p. 29.
25. См. Prigogine and Stengers (1984), p. 146ff.
26. Там же, p. 143.
27. Prigogine (1967).
28. Prigogine and Glansdorff (1971).
29. Цитируется по Paslack (1991), p. 105.
30. См. Graham (1987).
31. См. Paslack (1991), pp. 106-7.
32. Цитируется там же, p. 108; см. также Naken (1987).

- 33.Перепечатана в Haken (1983).
- 34.Graham (1987).
- 35.Цитируется по Paslack (1991),p. 111.
- 36.Eigen(1971).
- 37.См. Prigogine and Stengers (1984), p. 133ff, а также Laszlo (1987), p. 31ff.
- 38.См. Laszlo(1987), pp. 34-35.
- 39.Цитируется по Paslack (1991), p. 112.
- 40.Humberto Maturana в Maturana and Varela (1980), p. xii.
- 41.Maturana(1970).
- 42.Цитируется по Paslack (1991), p. 156.
- 43.Maturana (1970).
- 44.Цитируется по Paslack (1991), p. 155.
- 45.Maturana (1970); см. p. 162ff; подробности и примеры см. ниже, с. 182 и далее.
- 46.См. ниже, с. 285 и далее.
- 47.Humberto Maturana в Maturana and Varela (1980), p. xvii.
- 48.Maturana and Varela (1972).
- 49.Varela, Maturana and Uribe (1974).
- 50.Maturana and Varela (1980), p. 75.
- 51.См. выше, ее. 34 и 82— 83.
- 52.Maturana and Varela (1980), p. 82.
- 53.См. Capra (1985).
- 54.Geoffrey Chew, цитируется по Capra (1975), p. 296.
- 55.См. ниже, с. 176 и далее.
- 56.См. выше, ее. 37— 39 и 48.
- 57.См.Kelley(1988).
- 58.См. Lovelock (1979), p. Iff.
- 59.Lovelock (1991), pp. 21-22.
- 60.Там же, p. 12.
- 61.См. Lovelock (1979), p. 11.
- 62.Lovelock (1972).
- 63.Margulis (1989).
- 64.См. Lovelock (1991), pp. 108-11; см. также Harding (1994).
- 65.Margulis (1989).
- 66.См. Lovelock and Margulis (1974).
- 67.Lovelock (1991), p. 11.

- 68.См. выше, с. 40 и далее.
- 69.См. ниже, ее. 238— 239,252.
- 70.Lovelock (1991), p. 62.
- 71.См. там же, p. 62ff, см. также Harding (1994).
- 72.Harding (1994).
- 73.См. Lovelock (1991), pp. 70-72.
- 74.См. Schneider and Boston (1991).
- 75.Jantsch(1980).

Глава 6

Математика сложных систем

Взгляд на живые системы как на самоорганизующиеся сети, все компоненты которых взаимосвязаны и взаимозависимы, в процессе развития истории философии и науки неоднократно высказывался в той или иной форме. Однако подробные модели самоорганизующихся систем предложены лишь недавно, когда стал доступен новый математический инструментарий, позволивший ученым смоделировать нелинейные характеристики взаимосвязанности сетей. Открытие этой новой *математики сложности* все чаще признается учеными одним из важнейших событий XX века.

Теории и модели самоорганизации, описанные в предыдущих главах, имеют дело с весьма сложными системами, состоящими из тысяч взаимозависимых химических реакций. За последние три десятилетия появилось множество новых концепций и технологий для работы с феноменами такой огромной сложности; на базе этих концепций в настоящее время начинает формироваться согласованная математическая структура. И все же четкого названия этой новой математики пока нет. По научно-популярной литературе она известна как математика сложных систем, более технические названия звучат как теория динамических систем, системная динамика, комплексная динамика или нелинейная динамика. Вероятно, наиболее широко используется термин *теория динамических систем*.

Чтобы избежать путаницы, полезно помнить, что теория динамических систем не относится к физическим феноменам, это — математическая теория, концепции и методы которой применимы к достаточно широкому диапазону явлений. То же касается теории хаоса и теории фракталов — важных разделов теории динамических систем.

Новая математика (мы рассмотрим это подробно) является математикой взаимоотношений и паттернов. Имея скорее качественный, чем количественный характер, она тем самым обуславливает сдвиг акцента, что характерно для системного мышления — от объектов к взаимоотношениям, от количества к качеству, от материи к паттерну. Развитие мощных высокоскоростных компьютеров сыграло решающую роль в освоении сложных систем. Математики сегодня могут решать сложные уравнения, которые раньше не поддавались решению, и проследивать решения в виде кривых на графике. Таким способом они обнаружили новые качественные паттерны поведения этих сложных систем, новый уровень порядка, лежащий в основе кажущегося хаоса.

Классическая наука

Чтобы оценить новизну новой математики сложных систем, представляется интересным сопоставить ее с математикой классической науки. Наука, в современном понимании этого термина, появилась в конце XVI века, когда Галилео Галилей первым начал ставить систематические эксперименты, используя математический язык для формулирования открытых им законов природы. В те времена науку все еще называли «натуральной философией», и когда Галилей говорил «математика», он имел в виду геометрию. «Философия, — писал он, — записана в той Великой книге, которая всегда перед нашим взором; но мы не сможем понять ее, если сначала не выучим ее язык и те символы, которыми она написана. Этот язык — математика, а символы — это треугольники, окружности и другие геометрические фигуры»¹.

Галилео унаследовал эту точку зрения от философов античной Греции, которые были склонны геометризировать все математические проблемы и искать ответы в рамках геометрических фигур. Есть свидетельства, что над входом в Академию Платона, главную греческую школу науки и философии на протяжении девяти столетий, была высечена надпись: «Да не войдет сюда несведущий в геометрии».

Несколько веков спустя совершенно иной подход к решению математических проблем, известный как *алгебра*, был разработан в Персии мусульманскими философами, которые, в свою очередь, переняли его у индийских математиков. Название происходит от арабского *al-jabr* («связывать вместе») и относится к процессу сокращения числа неизвестных величин путем связывания их вместе в уравнения. В элементарной алгебре буквы в уравнениях — взятые обычно из начала алфавита — означают различные постоянные числа. Хорошо известным примером, который большинство читателей помнит со школьной скамьи, служит уравнение

$$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2.$$

В высшей алгебре рассматриваются взаимосвязи, называемые *функциями*, между неизвестными переменными числами, или *переменными*, которые условно обозначают последними буквами алфавита. Например, говорят, что в уравнении

$$y = x + 1$$

переменная y является *функцией* x . Это в математике кратко обозначается

$$y = f(x).$$

Таким образом, во времена Галилея существовало два различных подхода к решению математических проблем — геометрия и алгебра, которые пришли из разных культур. Два эти подхода были объединены Рене Декартом. Моложе Галилея на поколение, Декарт более всего

известен как основатель современной философии. Однако он был и блестящим математиком. Изобретенный Декартом метод преобразования алгебраических формул и уравнений в визуальную геометрическую форму стал величайшим из его многочисленных вкладов в математику.

Метод, известный как аналитическая геометрия, немислим без декартовых координат — системы координат, изобретенной Декартом и названной в его честь. Например, когда взаимосвязь между двумя переменными x и y из нашего предыдущего примера (уравнение $y = x + 1$) изображается графически в декартовой системе координат, мы видим, что она соответствует прямой линии (рис. 6-1). Вот почему уравнения такого типа называются линейными.

Подобным же образом уравнение $y = x^2$ представляется в виде параболы (рис. 6-2). Уравнения такого типа, соответствующие кривым линиям в декартовой сетке координат, называются нелинейными. Их отличительной чертой служит то, что одна или больше его переменных возведены в степень не менее 2-й.

Дифференциальные уравнения

В свете нового метода Декарта законы механики, открытые Галилеем, могли быть выражены либо в алгебраической форме как уравнения, либо в геометрической — как зримые фигуры. Однако существовала важная математическая проблема, которую ни Галилей, ни Декарт, ни кто-либо из их современников не могли решить. -

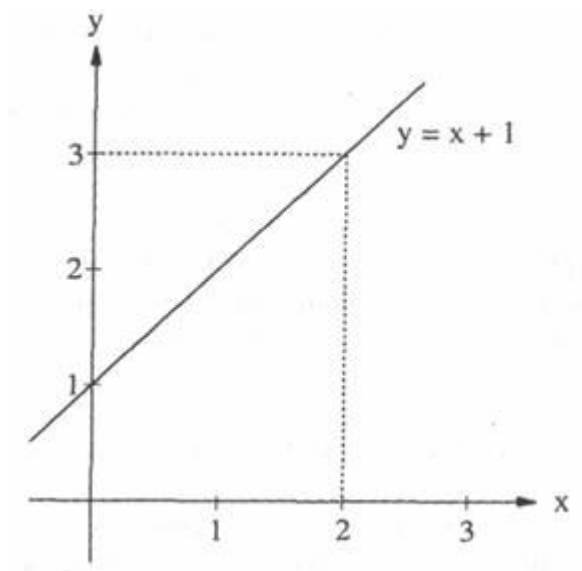


Рис. 6-1.

График, соответствующий уравнению $y = x + 1$. Для каждой точки на прямой линии значение y - координаты всегда будет на единицу больше значения соответствующей x - координаты

y

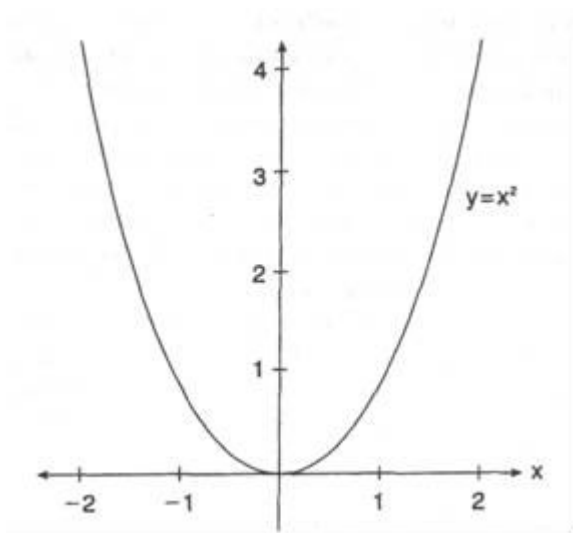


Рис. 6-2.

График, соответствующий уравнению $y = x^2$. Для любой точки параболы, y -координата равна квадрату x -координаты

Они не могли составить уравнение, описывающее движение тела с переменной скоростью, с ускорением или замедлением.

Чтобы понять эту проблему, рассмотрим два движущихся тела: одно передвигается с постоянной скоростью, другое — с ускорением. Если мы построим для них график зависимости расстояния от времени, то получим две кривые, показанные на рис. 6-3. Скорость ускоряющегося тела меняется каждое мгновение, и это именно то, что Галилей и его современники не могли выразить математически. Иными словами, они не могли вычислить точное значение скорости в данный момент времени.

Расстояние

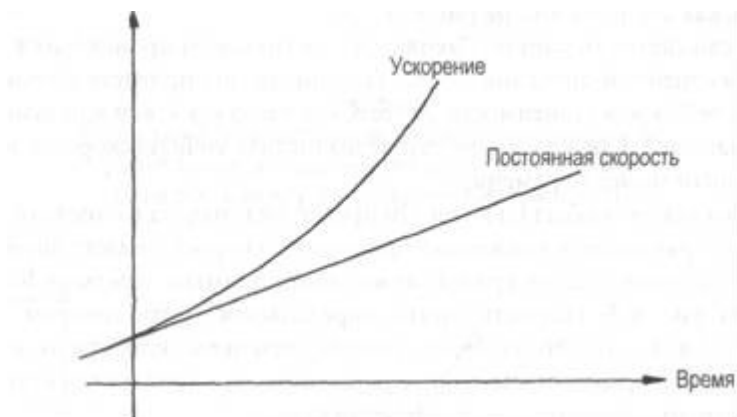


Рис. 6-3.

Графики движения двух тел: одного движущегося с постоянной скоростью, другого — с ускорением

Столетие спустя великану классической науки Исааку Ньютону и, примерно в то же время, немецкому философу и математику Готфриду Вильгельму Лейбницу удалось сделать это. Для того чтобы решить эту проблему, на протяжении веков мучившую математиков и натурфилософов, Ньютон и Лейбниц, независимо друг от друга, изобрели новый математический метод, сегодня известный как дифференциальное исчисление. Метафорически этот метод называется «воротами в высшую математику».

Понять, каким образом Ньютон и Лейбниц подошли к решению проблемы, представляется весьма поучительным и не требует знания специального математического языка. Всем известно, как вычислить скорость движущегося тела, если она остается постоянной. Если вы ведете машину со скоростью 20 км/ч, то это значит, что за час вы проедете 20 километров, за 2 часа — 40 и т. д. Другими словами, для того чтобы определить значение скорости машины, вы просто делите расстояние (например, 40 километров) на время, которое у вас уходит, чтобы его проехать (например, 2 часа). Применительно к нашему графику это означает, что разность между двумя координатами расстояния нужно поделить на разность между двумя соответствующими координатами времени, как это показано на рис. 6-4.

Если скорость машины меняется — а это всегда происходит в реальной жизненной ситуации, — то за один час вы проедете больше или меньше 20 км, в зависимости от того, как часто ускоряли или замедляли ход машины. Как же в таком случае вычислить точную скорость в определенный момент времени?

Вот как это сделал Ньютон. Он предложил сначала вычислить (в случае

ускоряющегося движения) примерную скорость между двумя точками, заменив участок кривой между ними прямым отрезком. Как видно из рис. 6-5, скорость опять определяется соотношением между $\{d_2-d_1\}$ и (t_2-t_1) . Это не будет точным значением скорости ни в одной из двух точек, но если уменьшить расстояние между ними в достаточной степени, мы получим хорошее приближение.

Затем Ньютон предложил: давайте стягивать треугольник, образованный кривой и разностями координат, сдвигая две точки на кривой все ближе и ближе друг к другу. Пока мы делаем это, отрезок прямой между двумя точками будет все ближе и ближе подходить к кривой, а погрешность в вычислении скорости между двумя точками будет все меньше и меньше. В конце концов когда мы достигаем *предела отношения бесконечно малых разниц* — это критический шаг! — две точки на кривой сливаются в одну, а мы получаем точное значение скорости в этой точке. Геометрически прямая, соответствующая этой скорости, расположится по касательной к кривой.

Стянуть этот треугольник — в математическом смысле — к нулю и вычислить соотношение между двумя бесконечно малыми разностями — задача отнюдь не тривиальная. Точное определение предела бесконечно малого — самый трудный момент всей процедуры исчисления.

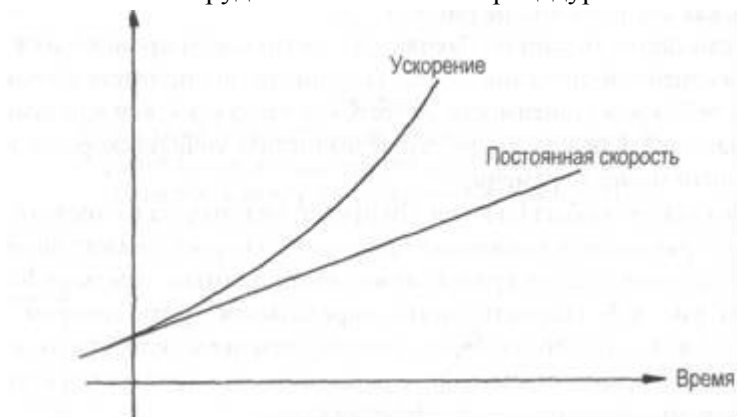


Рис. 6-4.

Чтобы вычислить постоянную скорость, нужно поделить разность между координатами расстояния (d_2-d_1) на разность между координатами времени (t_2-t_1)

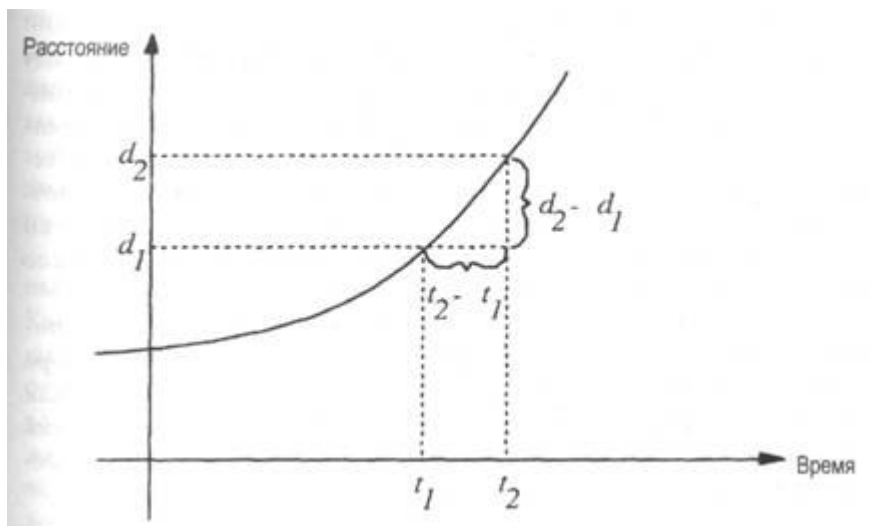


Рис. 6-5.

Вычисление приблизительного значения скорости между двумя точками в случае ускоряющегося движения

На математическом языке бесконечно малая разность называется дифференциалом; поэтому и исчисление, изобретенное Ньютоном и Лейбницем, известно как дифференциальное. Уравнения, в которые входят дифференциалы, называются дифференциальными уравнениями.

Изобретение дифференциального исчисления явилось для науки гигантским шагом вперед. Впервые в человеческой истории понятию бесконечного, волновавшему философов и поэтов с незапамятных времен, было дано точное математическое определение; оно открыло необозримые новые возможности для анализа естественных феноменов.

Мощь нового аналитического инструмента можно проиллюстрировать на знаменитом парадоксе Зенона, представителя ранней элейской школы греческой философии. Согласно Зенону, великий атлет Ахилл никогда не сможет догнать черепаху в забеге, если черепаха стартует первой, поскольку, как только Ахилл наверстает начальное отставание, черепаха за это время продвинется еще дальше, а когда Ахилл пробежит и это расстояние, у черепахи опять окажется фора, и так до бесконечности. И хотя отставание атлета продолжает сокращаться, оно никогда не исчезнет. В каждый данный момент черепаха всегда будет впереди. Поэтому, как заключает Зенон, даже самый быстрый бегун никогда не сможет состязаться с медлительной черепахой.

Греческие философы и их последователи веками спорили по поводу этого парадокса, но никак не могли разрешить его, поскольку точное определение бесконечно малого ускользало от них. Упущение в

аргументации Зенона кроется в том, что, даже если Ахиллу придется сделать бесконечное число *шагов*, чтобы догнать черепаху, это не займет бесконечного времени. Применяв аппарат исчисления Ньютона, можно легко показать, что движущееся тело промчится сквозь бесконечное число бесконечно малых интервалов за конечное время.

В XVII веке Исаак Ньютон использовал свое исчисление для описания любых возможных движений твердых тел с помощью набора дифференциальных уравнений, которые с тех пор стали известны как *ньютоновы уравнения движения*. Этот подвиг Эйнштейн восславил как «возможно, величайшее достижение мысли, которое когда-либо посчастливилось осуществить одному человеку»².

Лицом к лицу со сложностью

В течение XVIII и XIX столетий уравнения движения Ньютона были облечены в более общие, более абстрактные и более элегантные формы некоторыми из величайших умов в истории математики. Успешные новые формулировки, предложенные Пьером Лапласом, Леонардом Эйлером, Жозефом Лагранжем и Вильямом Гамильтоном, не изменили содержания ньютоновых уравнений, но их возрастающая сложность позволила ученым анализировать постоянно расширяющийся диапазон естественных явлений.

Применяя свою теорию к движению планет, Ньютон сам воспроизвел основные особенности Солнечной системы, правда, без учета некоторых тонкостей. Лаплас, однако, усовершенствовал вычисления Ньютона до такой степени, что ему удалось объяснить движение планет, их спутников и комет вплоть до мельчайших деталей, равно как и механизм приливов и других явлений, связанных с гравитацией.

Воодушевленные этими яркими успехами ньютоновской механики в астрономии, физики и математики распространили ее на движение жидкостей, на вибрацию струн, колоколов, других упругих тел — и она работала! Впечатляющие достижения заставили ученых начала XIX века поверить, что Вселенная на самом деле представляет собой гигантскую механическую систему, функционирующую в соответствии с ньютоновскими законами движения. Так ньютоновы дифференциальные уравнения стали математической основой механистической парадигмы. Мировая машина Ньютона казалась совершенно каузальной и детерминированной. Все, что происходит, обуславливается определенной причиной и вызывает определенный эффект, и будущее любой части этой системы можно — в принципе — предсказать с абсолютной достоверностью, если только в начальный момент времени ее состояние известно во всех подробностях.

На практике, конечно, вскоре стала очевидной ограниченность попыток

моделирования Природы с помощью ньютоновых уравнений. Как замечает британский математик Ян Стюарт, «*составлять* уравнения — одно дело, *решать* их — совсем другое»³. Точные решения были ограничены небольшим количеством простых и устойчивых явлений; в то же время существовали обширные области Природы, которые, похоже, исключали всякое механистическое моделирование. Например, относительное движение двух тел, обусловленное силой их тяготения, могло быть вычислено точно; для трех тел соответствующие расчеты становились слишком сложными или неточными; а когда дело касалось газов с миллионами частиц, ситуация казалась безнадежной.

С другой стороны, физики и химики уже долгое время наблюдали в поведении газов некие регулярности, нашедшие свое отражение в формулировке так называемых газовых законов — простых математических связей между температурой, объемом и давлением газа. Каким образом эта явная простота могла быть выведена из исключительно сложного движения отдельных молекул?

В XIX веке великий физик Джеймс Кларк Максвелл нашел ответ. И хотя поведение молекул газа не могло быть определено абсолютно точно, ученый утверждал, что наблюдаемые регулярности могут быть обусловлены *их усредненным* поведением. И Максвелл предложил использовать статистические методы для определения законов движения для газов:

Мельчайшая порция вещества, которую мы можем подвергнуть эксперименту, состоит из миллионов молекул, ни одна из которых индивидуально нами не ощущается. Мы не можем поэтому установить реальное движение ни одной из этих молекул; следовательно, мы вынуждены отказаться от прямого исторического метода и принять статистический метод для работы с большими группами молекул⁴.

Метод Максвелла и в самом деле оказался весьма успешным и позволил физикам объяснить основные свойства газа на основе усредненного поведения его молекул. Например, стало ясно, что давление газа — это сила, вызванная усредненным напором молекул⁵; оказалось также, что температура пропорциональна усредненной энергии движения молекул. Статистика и теория вероятности, теоретическая основа метода, развивались начиная еще с XVII века и уже были готовы к применению в теории газов. Объединение статистических методов с ньютоновской механикой привело к возникновению новой области науки, которая, соответственно, была названа *статистической механикой*; она и стала теоретической основой термодинамики — теории тепла.

Нелинейность

Итак, к концу XIX века ученые разработали два различных математических инструмента для моделирования естественных явлений — точный (детерминистские уравнения движения для простых систем) и уравнения термодинамики, основанные на статистическом анализе усредненных величин для сложных систем.

И хотя эти два подхода совершенно различны, есть у них и общая черта: они используют *линейные* уравнения. Ньютоновы уравнения движения носят весьма общий характер и применимы как для линейных, так и для нелинейных явлений; в действительности же нелинейные уравнения получаются гораздо чаще, можно сказать на каждом шагу. Однако, поскольку они обычно слишком сложны для решения и связаны с хаотической, на первый взгляд, природой соответствующих физических явлений — например, с турбулентными потоками воды и воздуха, — ученые, как правило, избегают изучения нелинейных систем⁶.

Поэтому, как только нелинейные уравнения появлялись, их тут же «линеаризовали», т. е. заменяли линейными приближениями. В результате, вместо того чтобы описывать явления во всей их сложности, уравнения классической науки имели дело с *малыми* колебаниями, *неглубокими* волнами, *небольшими* изменениями температуры и т. д. Как заметил Ян Стюарт, эта привычка укоренилась настолько, что многие уравнения линеаризовались *уже в ходе составления*, поэтому в учебники даже не включались полные нелинейные версии. И даже у большинства ученых и инженеров сложилось убеждение, что фактически все природные явления можно описать с помощью линейных уравнений. «Как мир был подобен заводным часам в XVIII столетии, так он стал линейным в XIX и большей части XX столетия»⁷.

Решительная перемена за последние три десятилетия выразилась в осознании того, что Природа, по выражению Стюарта, «безжалостно нелинейна». Нелинейные процессы преобладают в неодушевленном мире в гораздо более значительной степени, чем мы предполагали. Они также являются существенным аспектом сетевых паттернов живых систем. Теория динамических систем — первая математическая система, позволяющая ученым работать со всем диапазоном сложности этих нелинейных феноменов.

Исследования нелинейных систем за последние десятилетия оказали значительное влияние на науку в целом, поскольку заставили нас заново оценить некоторые фундаментальные представления о взаимоотношениях между математической моделью и теми феноменами, которые она описывает. Одно из таких представлений касается нашего понимания простоты и сложности.

Пробывая в мире линейных уравнений, мы думали, что системы,

описываемые простыми уравнениями, отличаются простым поведением, в то время как описываемые сложными уравнениями ведут себя гораздо сложнее. В нелинейном мире — который, как мы начинаем обнаруживать, составляет львиную долю реального мира — простые детерминистские уравнения могут таить в себе неожиданное богатство и разнообразие поведения. С другой стороны, сложное и кажущееся хаотичным поведение может породить упорядоченные структуры, тонкие и изящные паттерны. В теории хаоса сам термин *хаос* приобрел новое, техническое значение. Поведение хаотических систем не просто беспорядочно: оно проявляет более глубокий уровень *паттернового* порядка. Как мы увидим ниже, новый математический аппарат позволяет рассмотреть эти глубинные паттерны в явных и отчетливых формах.

Еще одно важное свойство нелинейных уравнений, которое всегда смущало ученых, заключается в том, что точное предсказание часто бывает неосуществимо, даже если уравнения строго детерминированы. Эта поразительная особенность нелинейности обусловила важный сдвиг акцента от количественного анализа к качественному.

Обратная связь и итерации

Третье важное свойство нелинейных систем вытекает из частого возникновения в них процессов с усиливающей обратной связью. В линейных системах малые изменения производят малые эффекты, а значительные эффекты являются следствием либо больших изменений, либо суммы множества мелких изменений. В нелинейных системах, напротив, мелкие изменения могут вызвать драматический эффект, если они многократно усиливаются через обратную связь. Такие нелинейные процессы с обратной связью лежат в основе неустойчивости и внезапного появления новых форм порядка, столь характерных для самоорганизации.

Математически петля обратной связи соответствует особому типу нелинейного процесса, известному как *итерация* (латинское «повторение»); в этом процессе функция многократно применяется к себе самой. Например, если функция состоит в умножении переменной на 3, т. е. $f(x) = 3x$, то итерация заключается в многократном умножении. В математике это записывается так:

$$x \rightarrow 3x$$

$$3x \rightarrow 9x$$

$$9x \rightarrow 27x$$

и

т.

д.

Каждый из этих шагов называется *отображением*. Если мы представим себе переменную x в виде числовой оси, то операция $x \rightarrow 3x$ отображает каждое число на другое число на этой же оси. В более общем случае

отображение, состоящее в умножении x на постоянное число k , записывается в виде:

$$x \rightarrow kx.$$

Часто встречаемой в нелинейных системах итерацией, очень простой и в то же время производящей огромную сложность, является отображение:

$$x \rightarrow kx(1 - x),$$

где переменная x ограничена значениями от 0 до 1. Это отображение, известное математикам как *логистическое*, имеет много важных приложений. Его, например, используют экологи для описания роста населения при противоположных тенденциях, и поэтому оно также известно как *уравнение роста*⁸.

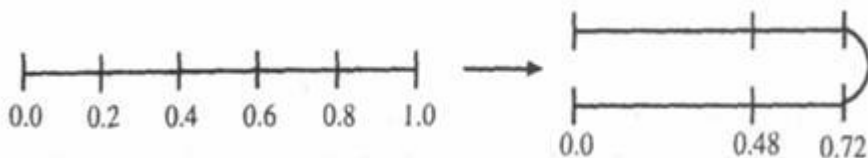
Исследование итераций разнообразных логистических отображений представляет собой увлекательное упражнение, которое можно легко осуществить с помощью карманного калькулятора⁹. Чтобы понять существенную особенность этих итераций, снова выберем значение $k=3$:

$$x \rightarrow 3x(1 - x).$$

Переменную x можно представить в виде участка оси от 0 до 1, тогда очень просто вычислить отображения для нескольких точек, например

0	→	0(1 - 0)	=	0
0.2	→	0.6 (1 - 0.2)	=	0.48
0.4	→	1.2 (1 - 0.4)	=	0.72
0.6	→	1.8 (1 - 0.6)	=	0.72
0.8	→	2.4 (1 - 0.8)	=	0.48
1	→	3(1 - 1)	=	0.

Отметив эти числа на двух участках оси, можно увидеть, что величины от 0 до 0,5 отображаются числами от 0 до 0,75. Таким образом, 0,2 превращается в 0,48, а 0,4 становится 0,72. Числа от 0,5 до 1 отображаются на том же участке, но в обратном порядке. Так, 0,6 превращается в 0,72, а 0,8 становится 0,48. Общий эффект показан на рис. 6-6. Отображение растягивает отрезок от 0 до 1,5, а затем снова сворачивает его так, что значения пробегают от 0 до 0,75 и обратно.



Итерация этого отображения выльется в повторяющееся растягивание и сворачивание операций подобно тому, как пекарь вновь и вновь месит тесто, сворачивая и растягивая его. Эту итерацию очень удачно назвали *преобразованием пекаря*. По мере того как происходит растягивание и

сжимание, соседние точки на отрезке будут все дальше и дальше расходиться, и предсказать, где окажется определенная точка после множества итераций, становится невозможно.

Даже самые мощные компьютеры округляют свои вычисления, ограничивая количество цифр после точки; и после большого количества итераций даже мелкие погрешности округления складываются в значительную неопределенность, исключая любые предсказания. Преобразование пекаря есть прототип нелинейных сверхсложных непредсказуемых процессов, обозначаемых специальным термином «хаос».

Пуанкаре и следы хаоса

Теория динамических систем — математическая теория, позволившая внести порядок в хаос, — была разработана совсем недавно, однако ее основы были заложены в начале XX века одним из величайших математиков нового времени Анри Пуанкаре. Среди математиков своего века Пуанкаре был последним великим эрудитом. Ученый внес весомый вклад фактически во все разделы математики. Собрание его сочинений исчисляется несколькими сотнями томов.

В конце XX века нам не трудно оценивать достижения Пуанкаре: важнейшее из них состояло в том, что он вернул в математику визуальные образы¹⁰. Начиная с XVII века, стиль европейской математики постепенно смещался от геометрии (математики визуальных форм) к алгебре (математике формул). Так, например, Лаплас, один из великих формализаторов, гордился тем, что в его *«Аналитической механике»* нет ни одного рисунка. Пуанкаре развернул тенденцию в обратном направлении, ослабляя засилье анализа и формул, становившееся все более гнетущим, и возвращаясь к визуальным паттернам.

Визуальная математика Пуанкаре, однако, не равнозначна геометрии Евклида. Это геометрия нового типа, математика паттернов и взаимоотношений, известная как топология. Топология — это геометрия, в которой все длины, углы и площади могут деформироваться как угодно. Так, треугольник может быть постепенно трансформирован в прямоугольник, прямоугольник — в квадрат, квадрат — в окружность. Точно так же куб может превратиться в цилиндр, цилиндр — в конус, конус — в сферу. Благодаря этим непрерывным преобразованиям топологию часто называют «резиновой геометрией». Все фигуры, которые могут быть преобразованы друг в друга посредством непрерывного сгибания, растягивания и кручения, называются топологически эквивалентными.

Тем не менее не все можно осуществить через топологическую трансформацию. Фактически топология занимается как раз теми свойствами геометрических фигур, которые не изменяются при их

трансформации. Пересечения линий, например, остаются пересечениями, а отверстие в торе (бублике) нельзя трансформировать так, чтобы оно пропало. Таким образом, бублик может быть топологически трансформирован в кофейную чашечку (отверстие превратится в отверстие ручки), но никак не в блин. Тогда топология оказывается действительно математикой взаимоотношений, неизменяемых, или инвариантных, паттернов.

Пуанкаре использовал топологическую концепцию для анализа качественных особенностей сложных динамических проблем — и тем самым заложил основы математики сложных систем, которая сформировалась лишь столетие спустя. Среди проблем, проанализированных Пуанкаре, была знаменитая проблема трех тел в небесной механике (относительное движение трех тел под влиянием их взаимного гравитационного притяжения), которую прежде никому не удавалось решить¹¹. Применяв свой топологический метод к слегка упрощенной проблеме трех тел, Пуанкаре смог определить общую форму их траекторий, и нашел, что она отличается устрашающей сложностью:

Когда пытаешься представить фигуру, образуемую этими двумя кривыми и бесконечными их пересечениями... обнаруживаешь некую сеть, паутину, или бесконечно густую решетку; ни одна из этих кривых никогда не может пересечь саму себя, но должна загибаться очень сложным образом, чтобы пересечь нити паутины бесконечно много раз. Поражает сложность этой фигуры, которую я даже не пытаюсь нарисовать¹².

То, что Пуанкаре изображал в уме, теперь называется *странным аттрактором*. По словам Яна Стюарта, «Пуанкаре видел отпечатки ступней хаоса»¹². Показав, что простые детерминированные уравнения движения могут порождать невообразимую сложность, не поддающуюся никаким попыткам предсказания, Пуанкаре бросил вызов самим основам ньютоновской механики. Однако по очередной причуде истории, ученые начала века не приняли этот вызов. Через несколько лет после того, как Пуанкаре опубликовал свою работу по проблеме трех тел, Макс Планк открыл энергетические кванты, а Альберт Эйнштейн опубликовал свою специальную теорию относительности¹⁴. В течение второй половины века физики и математики были зачарованы революционными открытиями в квантовой физике, теории относительности, а важнейшее открытие Пуанкаре отошло на задний план. Так продолжалось до 60-х годов, когда ученые вновь столкнулись со сложностями хаоса.

Траектории в абстрактных пространствах

Математический аппарат, позволивший ученым в течение трех последних десятилетий обнаружить упорядоченные паттерны в

хаотических системах, основан на топологическом подходе Пуанкаре и тесно связан с развитием компьютеров. С помощью современных высокоскоростных компьютеров ученые могут решать нелинейные уравнения такими методами, которые ранее были недоступны; легко могут вычерчивать сложные траектории, которые Пуанкаре даже не пытался изобразить.

Как большинство читателей помнят со школьной скамьи, уравнение решают посредством различных манипуляций с ним, пока не получают окончательную формулу — решение. Оно и называется «аналитическим» решением уравнения. Результатом всегда является формула. Большинство нелинейных уравнений, описывающих естественные явления, слишком сложны для того, чтобы их можно было решить аналитически. Однако есть еще один способ — так называемое «численное» решение уравнения. Оно включает в себя метод проб и ошибок. Вы пробуете разнообразные комбинации чисел для переменных, пока не найдете те, которые удовлетворяют уравнению. Была разработана специальная техника и специфические приемы для эффективного решения этой задачи, но для большинства уравнений подобный процесс оказывается слишком громоздким, занимает много времени и дает очень грубые, приближительные решения.

Ситуация изменилась с появлением нового поколения компьютеров. Теперь у нас есть программы для исключительно быстрого и точного численного решения уравнений. Применяя новые методы, мы можем решать нелинейные уравнения с любой степенью точности. Тем не менее это решения совершенно иного плана. Результатом становится не формула, а огромное множество значений переменных, удовлетворяющих уравнению, и компьютер можно запрограммировать так, чтобы он графически вычерчивал решение в виде кривой или множества кривых. Такая технология позволила ученым решить сложные нелинейные уравнения, связанные с хаотическими феноменами, и обнаружить порядок в кажущемся хаосе.

Для того чтобы обнаружить эти упорядоченные паттерны, переменные сложной системы отображаются в абстрактном математическом пространстве — так называемом *фазовом пространстве*. Эта хорошо известная методика была разработана в термодинамике еще в начале века¹⁵. Каждой переменной в системе ставится в соответствие одна из координат абстрактного пространства. Проиллюстрируем это очень простым примером: шариком, раскачивающимся на маятнике. Чтобы полностью описать движение маятника, требуются две переменные: угол, который может быть положительным либо отрицательным, и скорость, которая также может быть положительной или отрицательной, в зависимости от направления отклонения маятника. С помощью этих двух

переменных, угла и скорости, можно полностью описать состояние движения маятника в любой момент времени.

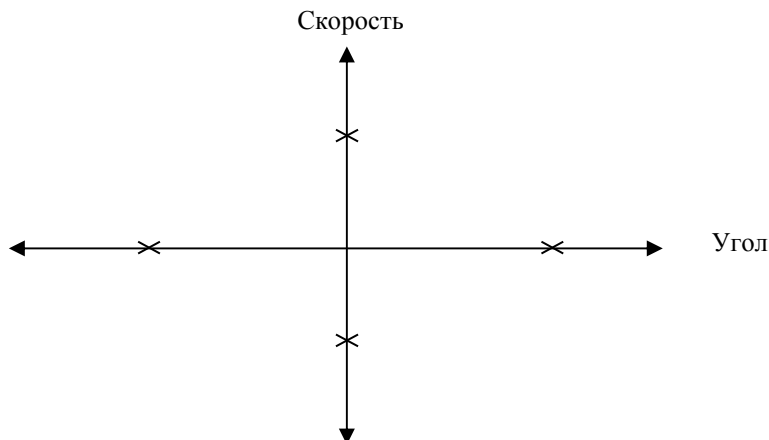


Рис. 6-7. Двухмерное фазовое пространство маятника

Если теперь мы начертим декартову систему координат, в которой одна ось соответствует углу, а другая — скорости (рис. 6-7), эта система координат представит двухмерное пространство, в котором каждая определенная точка соответствует возможному состоянию движения маятника. Посмотрим, где располагаются эти точки. В состоянии крайнего отклонения скорость равна нулю. Это дает нам две точки на горизонтальной оси. В центре, где угол равен нулю, скорость максимальна и либо положительна (когда маятник движется, например, вправо), либо отрицательна (когда маятник движется в противоположном направлении). Это дает нам две точки на вертикальной оси. Эти четыре точки в фазовом пространстве, которые мы обозначили на рис. 6-7, отражают крайние состояния маятника — максимальное отклонение и максимальную скорость. Точное расположение этих точек будет зависеть от выбранных нами единиц измерения.

Если мы продолжим наблюдения и отметим точки, соответствующие состояниям движения между крайними положениями, то обнаружим, что они лежат на замкнутой петле. Можно превратить петлю в окружность, должным образом выбрав единицы измерения, но, в общем случае, это будет нечто вроде эллипса (рис. 6-8).

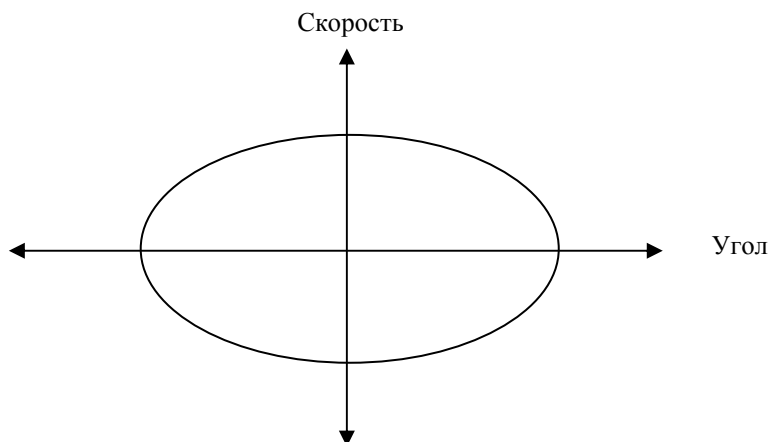


Рис. 6-8. Траектория маятника в фазовом пространстве

Эта кривая называется траекторией маятника в фазовом пространстве и полностью описывает движение системы. Все переменные системы (в нашем простом случае — две) представлены единственной точкой, всегда расположенной где-то на этой кривой. С каждым полным циклом качания маятника точка в фазовом пространстве будет описывать петлю.

В любой момент мы можем измерить две координаты точки в фазовом пространстве и таким образом узнать точное состояние системы (угол и скорость). Заметим, что эта кривая никоим образом не является траекторией самого маятника. Это кривая, образованная двумя переменными системы в абстрактном математическом пространстве.

В этом и заключается методика фазового пространства. Переменные данной системы изображаются в абстрактном пространстве, причем одна точка описывает всю систему. По мере того как система изменяет свое состояние, точка вычерчивает в фазовом пространстве траекторию — в нашем случае замкнутую кривую. Когда система является не простым маятником, а гораздо более сложной структурой, у нее, соответственно, больше переменных, но метод остается прежним. Каждая переменная представлена координатой в отдельном измерении фазового пространства. Если в системе 16 переменных, мы получим 16-мерное пространство. Одна точка в этом пространстве будет полностью описывать состояние всей системы, поскольку эта точка имеет 16 координат, каждая из которых соответствует одной из 16 переменных системы.

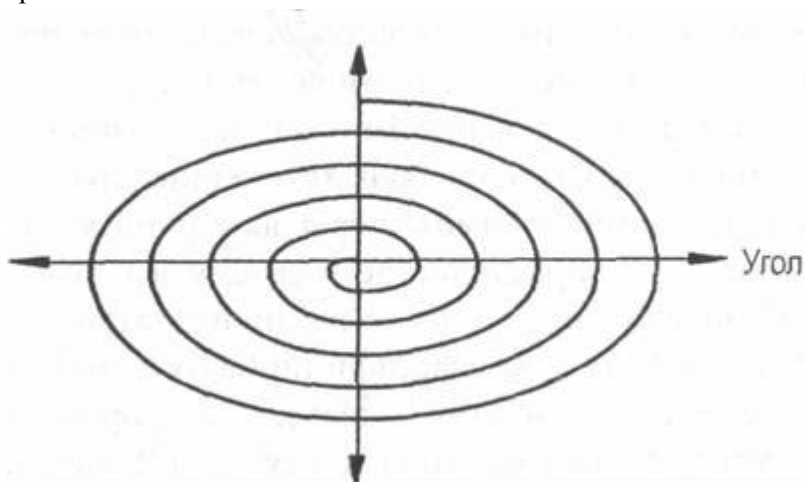


Рис. 6-9. Траектория маятника с трением в фазовом пространстве

Безусловно, мы не можем визуально воспринять фазовое пространство с 16 измерениями; потому его и называют абстрактным математическим пространством. Математики не испытывают никаких проблем с такими абстракциями. Они вполне комфортно чувствуют себя в пространствах, которые нельзя визуализировать. В любом случае, по мере изменения системы точка, определяющая ее состояние в фазовом пространстве, будет двигаться по этому пространству, вычерчивая некую траекторию. Различные начальные состояния системы соответствуют различным начальным точкам в фазовом пространстве, что, в общем случае, обуславливает различные траектории.

Странные аттракторы

Теперь вернемся к нашему маятнику и отметим, что это был идеализированный маятник без трения, раскачивающийся вправо-влево в бесконечном движении. Это типичный пример классической физики, где трением, как правило, пренебрегают. Реальный маятник всегда подвержен некоторому трению, замедляющему его ход, поэтому рано или поздно он остановится. В двухмерном фазовом пространстве это движение отображено кривой, закручивающейся к центру, как показано на рис. 6-9. Эта траектория называется *аттрактором*, поскольку математики говорят, что, в метафорическом смысле, фиксированная точка в центре системы координат *притягивает* (англ. «attract») эту траекторию. Метафору распространили и на замкнутые петли, подобные той, что представляет маятник без трения. Траектория в виде замкнутой петли получила название *периодического аттрактора*, в то время как траектория, закручивающаяся к центру, называется *точечным аттрактором*.

В течение последующих двадцати лет метод фазового пространства использовался для исследования множества сложных систем. Каждый раз ученые и математики составляют нелинейные уравнения, решают их численными методами, а компьютеры вычерчивают решения в виде траекторий в фазовом пространстве. К своему великому удивлению, исследователи обнаружили, что число различных аттракторов весьма ограничено. Их формы можно классифицировать топологически, а общие динамические свойства системы — вывести из формы ее аттрактора.

Существует три основных типа аттракторов: точечные, соответствующие системам, которые достигают устойчивого равновесия; периодические, соответствующие периодическим колебаниям; и так называемые странные аттракторы, соответствующие хаотическим системам. Типичный пример системы со странным аттрактором представляет собой «хаотический маятник», впервые исследованный японским математиком Йошисуке Уэда в конце 1970-х годов. Это нелинейная электронная схема с внешним питанием, относительно простая, но с исключительно сложным поведением¹⁶. Каждое колебание этого хаотического генератора колебаний уникально. Система никогда не повторяет себя, и каждый цикл открывает новую область фазового пространства. Тем не менее, несмотря на кажущуюся неустойчивость движения, точки в фазовом пространстве расположены отнюдь не беспорядочно. Вместе они формируют сложный высокоорганизованный паттерн — странный аттрактор, который теперь носит имя Уэда.



Рис. 6-10. Аттрактор Уэда. Из Ueda et al. (1993)

Аттрактор Уэда — это траектория в двухмерном фазовом пространстве, которая образует *почти* повторяющие друг друга паттерны. Это типичная особенность хаотических систем. Изображение на рис. 6-10 содержит более 1 000 000 точек. Ее можно представить в виде среза куска теста, который многократно растягивали и сворачивали. Это означает, что в основе аттрактора Уэда лежит *математика преобразования пекаря*.

Одно удивительное свойство странных аттракторов заключается в том, что они, как правило, ограничены малым числом измерений — даже в многомерном фазовом пространстве. Например, система может содержать 50 переменных, но ее движение при этом описывается трехмерным странным аттрактором — свернутой поверхностью в 50-мерном пространстве. Это, естественно, характеризует высокую степень порядка.

Таким образом, хаотичное поведение — в современном научном понимании этого термина — разительно отличается от беспорядочного, неустойчивого движения. С помощью странных аттракторов можно определить различие между обычной беспорядочностью, или *шумом*, и *хаосом*. Хаотичное поведение детерминировано и образует паттерны, а странные аттракторы позволяют преобразовывать на первый взгляд случайные данные в отчетливые визуальные формы.

«Эффект бабочки»

Как мы видели на примере преобразования пекаря, для хаотических систем характерна чрезвычайная чувствительность к начальным условиям. Мельчайшие изменения в начальном состоянии системы со временем приводят к крупномасштабным последствиям. В теории хаоса это называется «эффектом бабочки». Основой для названия послужило полшутливое утверждение, что бабочка, всколыхнув сегодня воздух в Пекине, может через месяц оказаться причиной бури в Нью-Йорке. Эффект бабочки был открыт в начале 1960-х годов метеорологом Эдвардом Лоренцом, разработавшим очень простую модель погодных условий, состоящую из трех связанных нелинейных уравнений. Он обнаружил, что решения его уравнений чрезвычайно чувствительны к начальным состояниям. Начинаясь практически в одной точке, две траектории будут развиваться совершенно по-разному, исключая возможность каких бы то ни было заблаговременных предсказаний¹⁷.

Это открытие привело в замешательство все мировое научное сообщество, поскольку ученые давно привыкли полагаться на детерминированные уравнения для предсказания с большой точностью таких феноменов, как солнечные затмения или появление комет. Казалось непостижимым, что четко детерминированные уравнения движения могут привести к непредсказуемым результатам. И все же именно это обнаружил Лоренц. По его собственным словам:

Обычный человек, видя, что мы достаточно эффективно предсказываем приливы на несколько месяцев вперед, спросит, почему мы не можем проделать то же самое в отношении атмосферы. Ведь это всего лишь другая система потоков и ее законы не более сложны. Но я понял, что любая физическая система, не проявляющая периодичности в поведении, непредсказуема¹⁸.

Модель Лоренца не представляет какого-то реального феномена погоды, но служит поразительным примером того, как простой набор нелинейных уравнений может привести к крайне сложному поведению.

Публикация этой модели в 1963 году знаменовала зарождение теории хаоса, и аттрактор, известный с тех пор как аттрактор Лоренца, стал самым известным и широко изучаемым из странных аттракторов. В то время как аттрактор Уэда двумерен, аттрактор Лоренца расположен в трех измерениях (рис. 6-11). Вычерчивая его, точка в фазовом пространстве движется по видимости случайным образом и описывает несколько колебаний нарастающей амплитуды вокруг одного центра, затем следуют колебания вокруг второго центра, потом она внезапно возвращается и осциллирует вокруг первого центра и т. д.

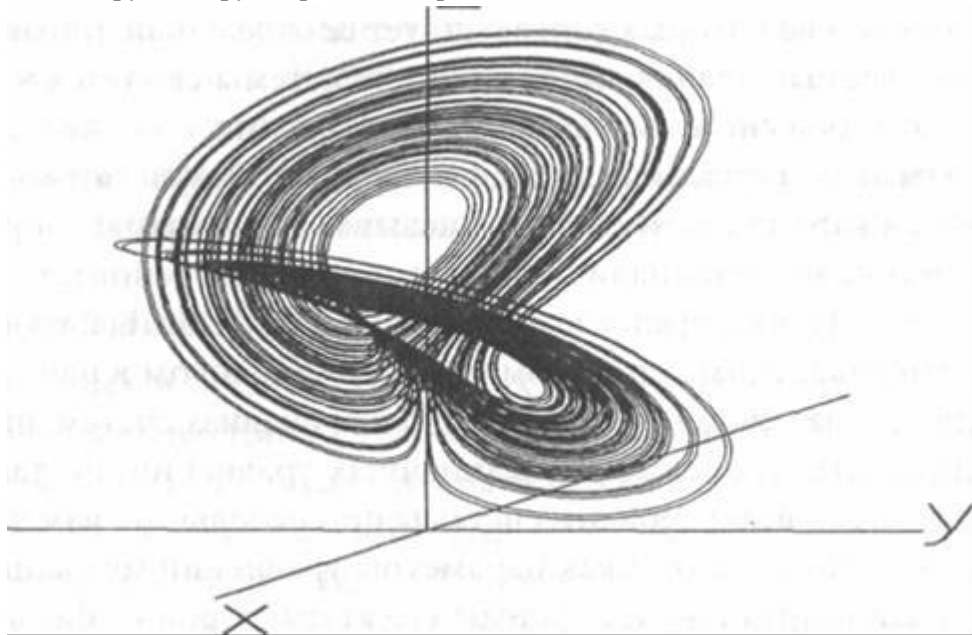


Рис. 6-11. Аттрактор Лоренца. Из Mosekilde et al. (1994)

От количества к качеству

Невозможность предсказать, какую точку в фазовом пространстве пересечет траектория аттрактора Лоренца в определенный момент

времени, являет собой общую для хаотических систем особенность. Однако это вовсе не означает, что теория хаоса не дает оснований никаким предсказаниям. Возможны чрезвычайно точные прогнозы относительно качественных особенностей поведения системы, а не точных значений ее переменных в определенный момент времени. Новая математика, таким образом, представляет сдвиг от количества к качеству, что характерно для системного мышления вообще. В то время как традиционная математика имеет дело с количествами и формулами, теория динамических систем связана с качеством и паттерном.

Действительно, анализ нелинейных систем с помощью топологических характеристик их аттракторов известен как *количественный анализ*. У нелинейной системы может быть несколько аттракторов разных типов, как хаотичных, или «странных», так и нехаотичных. Все траектории, начинающиеся в определенной области фазового пространства, рано или поздно приводят к одному и тому же аттрактору. Эта область называется сферой притяжения данного аттрактора. Таким образом, фазовое пространство нелинейной системы разбивается на несколько сфер притяжения, каждой из которых соответствует ее отдельный аттрактор.

Количественный анализ динамической системы сводится к определению аттракторов системы и сфер их притяжения, а также классификации их в рамках топологических характеристик. Результатом является динамическая картина всей системы, называемая фазовым портретом. Математические методы анализа фазовых портретов основаны на новаторских трудах Пуанкаре; впоследствии они были развиты и усовершенствованы американским топологом Стивеном Смейлом в начале 60-х¹⁹. Смейл использовал свой метод не только для анализа систем, представленных определенным набором нелинейных уравнений, но также для изучения того, как ведут себя эти системы при небольших изменениях в их уравнениях. По мере того как параметры уравнений медленно меняются, фазовый портрет — т. е. формы его аттракторов и сферы притяжения — как правило, претерпевает соответствующие плавные изменения, не изменяя своих основных характеристик. Смейл использовал термин «структурно устойчивый» для описания таких систем, в которых небольшие отклонения в уравнениях не изменяют основного характера фазового портрета.

Во многих нелинейных системах, однако, малые изменения в определенных параметрах могут обусловить серьезные изменения основных характеристик фазового портрета. Аттракторы могут исчезнуть или превратиться из одного в другой, могут также внезапно появиться новые аттракторы. Говорят, что такие системы структурно неустойчивы, и критические точки неустойчивости называют *точками бифуркации* («разветвления»), поскольку в эволюции системы именно в этих местах

внезапно появляется «вилка», и система отклоняется в том или ином новом направлении. В математическом смысле, точки бифуркации отмечают внезапные изменения фазового портрета системы. В физическом смысле, они соответствуют точкам неустойчивости, в которых система резко изменяется, и неожиданно появляются новые формы упорядоченности. Как показал Пригожий, такие неустойчивости случаются только в открытых системах, далеких от равновесия²⁰.

Поскольку типов аттракторов достаточно мало, то не много существует и различных типов бифуркации; следовательно, их можно классифицировать топологически, как и аттракторы. Одним из первых, кто в 70-е годы осуществил это, был французский математик Рене Том; он использовал термин *катастрофы* вместо *бифуркации* и определил семь элементарных катастроф²¹. В настоящее время математикам известно примерно в три раза больше типов бифуркаций. Ральф Эбрахам, профессор математики в Калифорнийском университете в Санта-Круз, вместе с художником-графиком Кристофером Шоу создали серию книг по визуальной математике без единого уравнения или формулы; авторы считают эти книги началом полной энциклопедии бифуркаций²².

Фрактальная геометрия

В то время как в течение 60-х и 70-х гг. ученые исследовали странные аттракторы, независимо от теории хаоса была изобретена *фрактальная геометрия*, давшая мощный математический язык для описания тонкой структуры хаотических аттракторов. Автором этого нового языка стал французский математик Бенуа Мандельбро. В конце 50-х Мандельбро начал изучать геометрию самых разнообразных нерегулярных естественных феноменов, а в 60-е годы он осознал, что у всех рассматриваемых им геометрических форм есть поразительные общие особенности. В последующие десять лет Мандельбро разрабатывал новый тип математики, чтобы описать и проанализировать эти особенности. Он ввел термин *фрактал*, характеризующий его изобретение, и опубликовал свои результаты в замечательной книге «*Фрактальная геометрия природы*». Книга имела огромное влияние на новое поколение математиков, развивавших теорию хаоса и другие разделы теории динамических систем²³.

Недавно в одной из бесед Мандельбро пояснил, что фрактальная геометрия имеет дело с тем аспектом Природы, который каждому известен, но который никто еще не смог описать в формальных математических терминах²⁴. Некоторые природные характеристики геометричны в традиционном смысле. Ствол дерева более или менее подобен цилиндру; полная Луна более или менее напоминает круглый диск; планеты движутся вокруг Солнца по более или менее эллиптическим

траекториям. Однако это исключения, и Мандельбро напоминает нам:

Чаще всего природа в высшей степени сложна. Как описать облако? Облако — это не сфера... Оно похоже на мяч, но очень неупорядоченно. А гора? Гора — не конус... Если вы хотите говорить о горах, реках, молнии, геометрический школьный язык оказывается совершенно неадекватным.

И Мандельбро создал фрактальную геометрию — «язык, на котором можно говорить об облаках», — чтобы описывать и анализировать сложность нерегулярных форм в окружающем нас мире природы.

Наиболее поразительное свойство этих «фрактальных» форм заключается в том, что их характерные паттерны многократно повторяются на нисходящих уровнях так, что их части на любом уровне по форме напоминают целое. Мандельбро иллюстрирует это свойство *самоподобия*, отламывая кусочек цветной капусты и указывая на то, что сам по себе кусочек выглядит как маленький кочан цветной капусты²⁵. Он продолжает демонстрацию, деля часть дальше, изымая еще один кусочек, который тоже выглядит как очень маленький кочан. Таким образом, каждая часть выглядит как целый овощ. Форма целого подобна самой себе на всех уровнях выбранного диапазона.

В природе встречается множество других примеров самоподобия. Камни в горах напоминают маленькие горы; ответвления молнии или края облаков снова и снова повторяют один и тот же паттерн; побережье моря можно делить на все более мелкие части, и в каждой из них будут проявляться подобные друг другу очертания береговой линии. Фотографии дельты реки, кроны дерева или ветвления кровеносных сосудов могут проявлять паттерны такого разительного сходства, что мы порой не можем отличить один от другого. Подобие образов совершенно различных масштабов было известно очень давно, но до Мандельбро никто не владел математическим языком для описания этого явления.

Когда в середине 70-х Мандельбро опубликовал свою новаторскую книгу, он еще сам не догадывался о связи между фрактальной геометрией и теорией хаоса, но ему и его коллегам-математикам не понадобилось много времени, чтобы обнаружить, что странные аттракторы могут служить изысканнейшими примерами фракталов. Если части их структуры увеличить, то обнаруживается многослойная субструктура, в которой вновь и вновь повторяются одни и те же паттерны. В связи с этим странные аттракторы стали определять как траектории в фазовом пространстве, в которых проявляются черты фрактальной геометрии.

Еще одна важная связь между теорией хаоса и фрактальной геометрией проявилась в переходе от количества к качеству. Как мы видели, невозможно предсказать значения переменных хаотической системы в

определенный момент времени, но можно предсказать качественные особенности поведения системы. Точно так же, невозможно вычислить длину или площадь фрактальной формы, однако можно — качественным способом — определить степень ее изрезанности.

Мандельбро подчеркнул эту существенную особенность фрактальных форм, задав провоцирующий вопрос: какова протяженность побережья Британии? Он показал, что, поскольку измеряемую длину можно растягивать до бесконечности, переходя ко все более мелкому масштабу, на этот вопрос нет однозначного ответа. Зато можно определить число в диапазоне от 1 до 2, которое характеризует изрезанность побережья. Для британского побережья это число равно около 1,58; для более изрезанного норвежского берега оно близко к 1,7027.

Поскольку можно показать, что это число имеет определенные свойства размерности, Мандельбро назвал его *фрактальной размерностью*. Мы можем понять эту идею интуитивно, зная, что извилистая линия занимает больше пространства на плоскости, чем одномерная гладкая линия, но меньше, чем сама двухмерная плоскость. Чем больше изрезана линия, тем ближе к числу 2 ее фрактальная размерность. Подобным же образом, скомканный лист бумаги занимает больше пространства, чем плоскость, но меньше, чем сфера. Таким образом, чем плотнее скомкана бумага, тем ближе к числу 3 будет ее фрактальная размерность.

Концепция фрактальной размерности, изначально появившаяся как чисто абстрактная математическая идея, превратилась со временем в мощный инструмент анализа сложности фрактальных форм, поскольку замечательно соответствует нашему жизненному опыту. Чем более изрезаны очертания молнии или границы облаков, чем менее сглажены формы побережий или гор, тем выше их фрактальные размерности. Чтобы смоделировать фрактальные формы, встречающиеся в природе, можно сконструировать геометрические фигуры, обладающие точным самоподобием. Основным методом для построения таких математических фракталов служит итерация, т. е. многократное повторение определенной геометрической операции. Процесс итерации, который привел нас к преобразованию пекаря — математической операции, лежащей в основе странных аттракторов, — оказался, таким образом, главной математической особенностью, объединяющей теорию хаоса с фрактальной геометрией.

Одной из простейших фрактальных форм, производимых итерацией, является так называемая кривая Коха, или «кривая снежинки»²⁷. Геометрическая операция заключается в том, чтобы разбить отрезок линии на три равные части и затем заменить центральную секцию двумя сторонами равностороннего треугольника, как показано на рис. 6-12.

Повторение этой операции во все более мелких масштабах приводит к появлению кружевной снежинки (рис. 6-13). Как и в случае с изрезанной береговой линией, кривая Коха становится бесконечно длинной, если итерация продолжается бесконечно. В сущности, кривую Коха можно рассматривать как очень грубую модель береговой линии (рис. 6-14).



Рис. 6-12.

Геометрическая операция для построения кривой Коха



Рис. 6-13.

Снежинка Коха

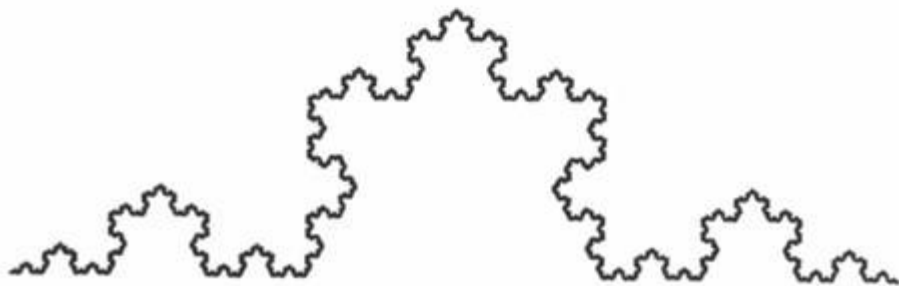


Рис. 6-14. Моделирование береговой линии с помощью кривой Коха

Математика сложных систем

С помощью компьютеров простые геометрические итерации можно применять тысячи раз в различных масштабах, производя так называемые фрактальные подделки — компьютерные модели растений, деревьев, гор, береговых линий и т. п., обладающие поразительным сходством с реальными формами, которые встречаются в природе. На рис. 6-15 приведен пример такой подделки. Производя итерацию над простым рисунком веточки в различных масштабах, удалось получить красивое и и

сложное изображение папоротника.

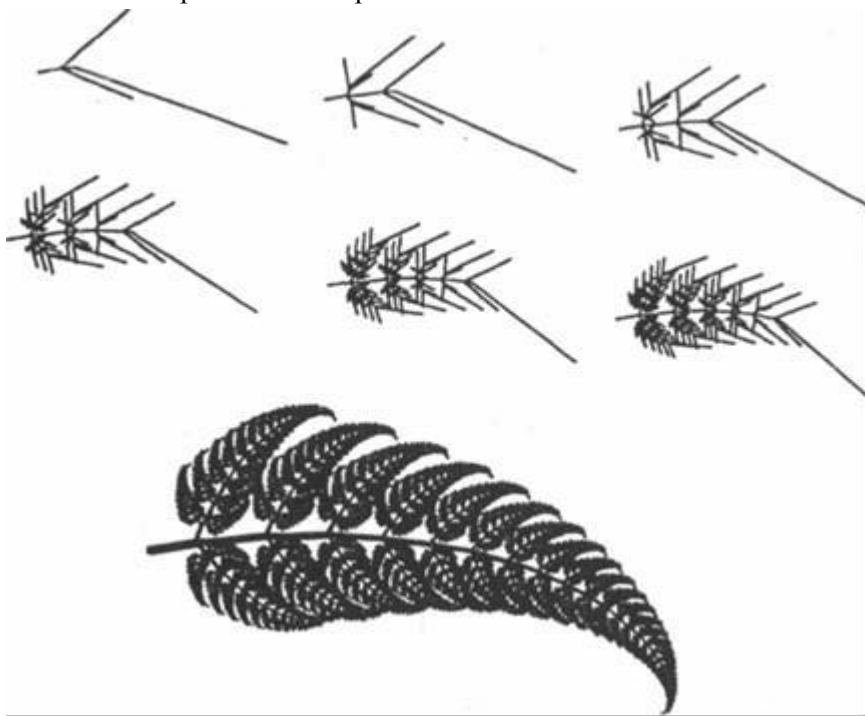


Рис. 6-15. Фрактальная подделка папоротника. Из Garcia (1991)

Этот новый математический аппарат позволил ученым строить точные модели разнообразных нерегулярных естественных форм. Занимаясь этим моделированием, они повсеместно обнаруживали присутствие фракталов. Фрактальные паттерны облаков, которые изначально воодушевили Мандельбро на поиски нового математического языка, вероятно, самые изумительные. Их самоподобие охватывает семь порядков величин, а это означает, что если границу облака увеличить в 10 000 000 раз, она будет иметь все ту же знакомую форму.

Комплексные числа

Вершиной фрактальной геометрии стало открытие Мандельбро математической структуры, которая обладает ошеломляющей сложностью и все же может быть воспроизведена с помощью очень простой итеративной процедуры. Чтобы понять эту поразительную фрактальную фигуру, известную как *множество Мандельбро*, необходимо сначала ознакомиться с одним из важнейших математических понятий — комплексными числами.

Открытие комплексных чисел стало восхитительной главой в истории математики²⁸. Когда в средние века возникла алгебра и математики

принялись исследовать все виды уравнений и классифицировать их решения, они вскоре столкнулись с задачами, не имевшими решения в рамках множества известных им чисел. В частности, уравнения типа $x + 5 = 3$ заставили их расширить понятие числа до отрицательных чисел, так чтобы решение могло быть записано как $x = -2$. В дальнейшем так называемые действительные числа — положительные и отрицательные целые числа, дроби и иррациональные числа (например, квадратные корни или знаменитое число π) — стали представлять как точки на единой плотно населенной числовой оси (рис. 6-16).

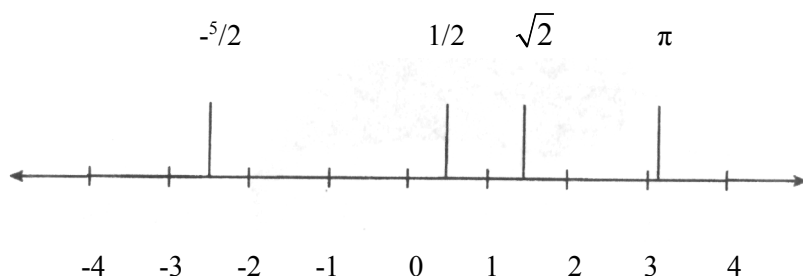


Рис. 6-16 Числовая ось

С таким расширением понятия числа все алгебраические уравнения, в принципе, могли быть решены — за исключением тех, где фигурировали квадратные корни отрицательных чисел. Уравнение $x^2 = 4$ имеет два решения: $x = 2$ и $x = -2$; однако для $x^2 = -4$, по всей видимости, не должно быть решения, поскольку ни $+2$, ни -2 при возведении в квадрат не дадут -4 .

Древние индийские и арабские алгебраисты постоянно встречались с такими уравнениями, но отказывались даже записывать выражения типа $\sqrt{-4}$, считая их абсолютно бессмысленными. И только в XVI веке квадратные корни отрицательных чисел стали появляться в алгебраических текстах, но и тогда авторы спешили пояснить, что такие выражения на самом деле ничего не означают.

Декарт называл квадратный корень отрицательного числа «мнимым числом» и был уверен, что появление таких мнимых чисел в расчетах означает, что проблема неразрешима. Другие математики использовали термины «фиктивные», «фальшивые» или «невозможные» для обозначения величин, которые сегодня мы, с легкой руки Декарта, все еще называем *мнимыми числами*.

Поскольку квадратный корень отрицательного числа не может быть помещен ни в одной точке числовой оси, математики, вплоть до XIX столетия, не могли наделить эти величины никаким реальным смыслом.

Великий Лейбниц, изобретатель дифференциального исчисления, приписывал выражению $\sqrt{-1}$ мистические свойства, видя в нем проявление Божественного Духа и называя его «этой амфибией между бытием и небытием»²⁹. Столетие спустя Леонард Эйлер, самый плодотворный математик всех времен, выразил ту же мысль в своей «Алгебре» словами хотя и менее поэтичными, но все же содержащими отголосок Чуда:

Следовательно, все такие выражения, как $\sqrt{-1}$, $\sqrt{-2}$ и т. п., есть невозможные, или мнимые числа, поскольку представляют корни отрицательных величин; по поводу таких чисел мы можем достоверно утверждать, что они ни ничто, ни нечто большее, чем ничто, ни нечто меньшее, чем ничто, из чего неизбежно следует, что они мнимы, или невозможны³⁰.

В XIX веке другой математический гений, Карл Фридрих Гаусс, окончательно и твердо провозгласил, что «этим мнимым сущностям может быть приписано объективное бытие»³¹. Гаусс, конечно, понимал, что мнимым числам не найдется места на числовой оси, а поэтому он попросту поместил их на перпендикулярную ось, которую провел через нулевую точку основной оси, построив таким образом декартову систему координат. В этой системе все действительные числа располагаются на действительной оси, а все мнимые числа — на мнимой оси (рис. 6-17). $\sqrt{-1}$ называется мнимой единицей и обозначается символом i . А поскольку любой квадратный корень отрицательного числа всегда может быть представлен как $\sqrt{-a} = \sqrt{-1} \sqrt{a} = i\sqrt{a}$, то все мнимые числа можно расположить на мнимой оси как кратные »'.

Таким остроумным способом Гаусс создал прибежище не только для мнимых чисел, но и для всех возможных комбинаций действительных и мнимых чисел, например, $(2 + i)$, $(3 - i)$ и т. п. Такие комбинации получили название *комплексных чисел*; они представлены точками на плоскости, которая называется *комплексной плоскостью* и образована действительной и мнимой осями. В общем случае любое комплексное число можно записать в виде

$$z = x + iy,$$

где x — действительная часть, а y — мнимая часть.

Введя это определение, Гаусс создал специальную алгебру комплексных чисел и разработал множество фундаментальных идей в области функций комплексного переменного. В конце концов это привело к появлению целого раздела математики, известного как комплексный анализ, который выделяется огромным диапазоном применений в самых разнообразных областях науки.

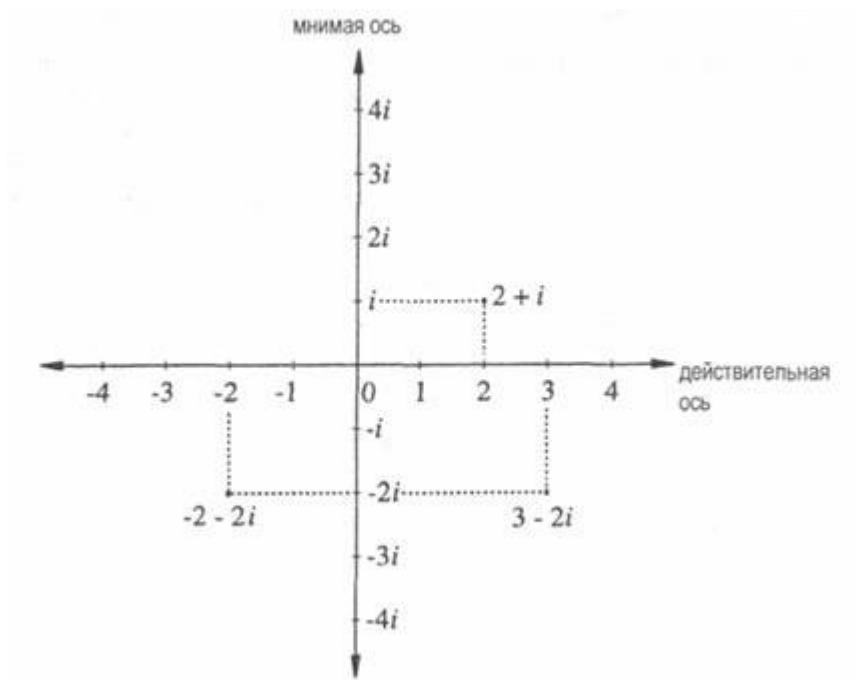


Рис. 6-17. Комплексная плоскость

Паттерны внутри паттернов

Причина, по которой мы затеяли этот экскурс в историю комплексных чисел, заключается в том, что многие фрактальные формы могут быть воспроизведены математически, с помощью итеративных процедур на комплексной плоскости. В конце 70-х годов, опубликовав свою новаторскую книгу, Мандельбро обратил внимание на особый класс математических фракталов, известных как *множества Жулия*³². Эти множества были открыты французским математиком Гастоном Жулиа в начале XX столетия, но скоро канули в безвестность. Интересно отметить, что Мандельбро впервые наткнулся на работы Жулиа еще студентом, посмотрел на его примитивные рисунки (выполненные в те времена без помощи компьютера) и потерял к ним интерес. Спустя полвека, однако, Мандельбро понял, что рисунки Жулиа представляют собой грубые наброски сложных фрактальных форм; и он принялся подробно воспроизводить их с помощью самых мощных компьютеров, какие только сумел найти. Результаты оказались поразительными.

В основу множества Жулиа положено простое отображение

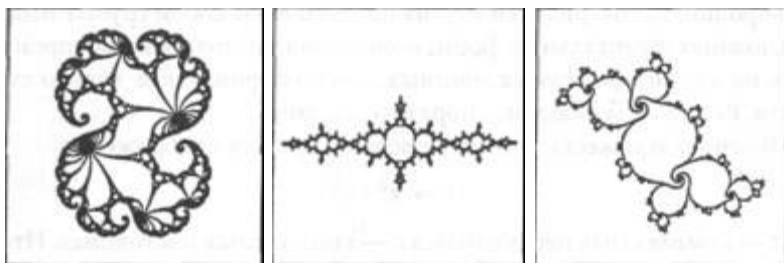
$$Z \rightarrow Z^2 + C,$$

Где z — комплексная переменная, а c — комплексная постоянная.

Итеративная процедура состоит в выборе любого числа z на комплексной плоскости, возведении его в квадрат, добавлении константы c , возведении результата в квадрат, добавлении к нему константы c и т. п. Когда это вычисление выполняется с различными начальными значениями z , некоторые из них будут увеличиваться до бесконечности в ходе процесса итерации, в то время как другие остаются конечными³³. Множество Жулиа — это набор всех тех значений z , или точек на комплексной плоскости, которые при итерации ограничены некоторым пределом, т. е. конечны.

Чтобы определить тип множества Жулиа для определенной константы c , итерацию необходимо каждый раз выполнить для нескольких тысяч точек, пока не выяснится, продолжают ли значения увеличиваться или остаются конечными. Если конечные точки помечать черным Цветом, а те, что продолжают увеличиваться, — белым, множество Жулиа в конце концов проявится в виде черной фигуры. Вся процедура очень проста, но занимает много времени. Очевидно, необходимо использование высокоскоростного компьютера, чтобы получить точную форму за приемлемое время.

Для каждой константы c можно получить различные множества Жулиа, поэтому число этих множеств неограниченно. Некоторые из них представляют собой отдельные, связанные между собой части; другие распадаются на несколько изолированных частей; а третьи выглядят так, будто они рассыпались на мелкие осколки (рис. 6-18). Все множества отличаются неровными, изрезанными очертаниями, что характерно для фракталов, и большинство из них невозможно описать языком классической геометрии. «Получается невообразимое разнообразие множеств Жулиа, — восхищается французский математик Адриен Дуади. — Одни напоминают плотные облака, другие — тощий куст ежевики, а некоторые похожи на искры, парящие в воздухе после фейерверка. Встречается форма кролика, многие напоминают хвосты морских коньков»³⁴.



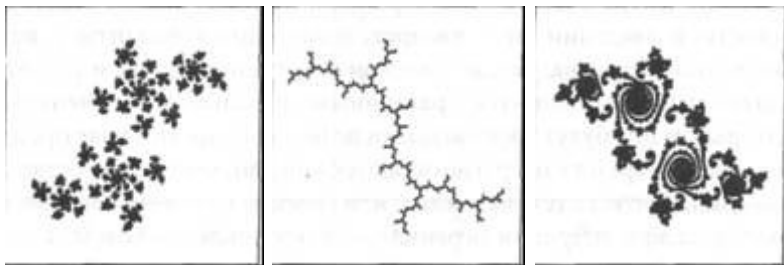


Рис. 6-18. Разнообразие множеств Жулиа. Из Peitigen and Richter (1986)

Богатство и разнообразие форм, многие из которых напоминают живые создания, просто поражает. Однако настоящие чудеса начинаются, когда мы увеличиваем очертания любой части множества Жулиа. Как и в случае с облаком или береговой линией, такое же богатство отображается на всех уровнях диапазона исследования. С увеличением степени разрешения (т. е. когда все больше и больше знаков после точки учитывается при вычислении числа z) появляется все больше и больше деталей контура фрактала и обнаруживается фантастическая последовательность паттернов внутри паттернов — похожих, но никогда не идентичных друг другу.

Когда Мандельбро в конце 70-х годов анализировал различные математические проявления множеств Жулиа, пытаясь классифицировать их бесконечное многообразие, он открыл очень простой способ создания единого изображения на комплексной плоскости, которое может служить своеобразным каталогом всех возможных множеств Жулиа. Это изображение, с тех пор ставшее основным визуальным символом новой математики сложных систем, называется *множеством Мандельбро* (рис. 6-19). Это просто совокупность на комплексной плоскости всех точек с константой c , для которых соответствующие множества Жулиа представляют единые связные области. Чтобы построить множество Мандельбро, таким образом, следует построить отдельное множество Жулиа для каждой точки c на комплексной плоскости и определить, является ли это конкретное множество *связным* или *разделенным*. Например, среди множеств Жулиа, изображенных на рис. 6-18, три набора в верхнем ряду и один в центре нижнего ряда — связны (т. е. каждое из них представляет собой единую фигуру), в то время как крайние наборы в нижнем ряду разделены (т. е. состоят из нескольких отдельных областей).

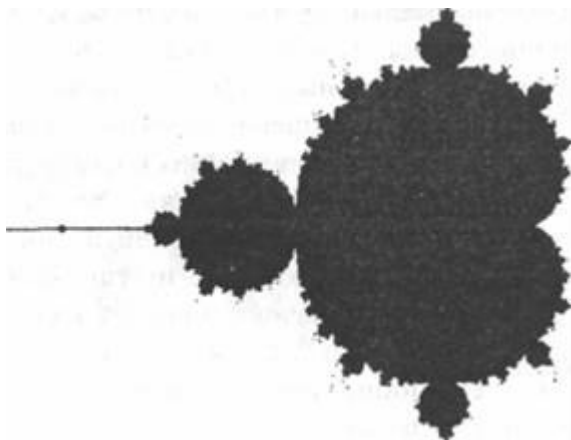


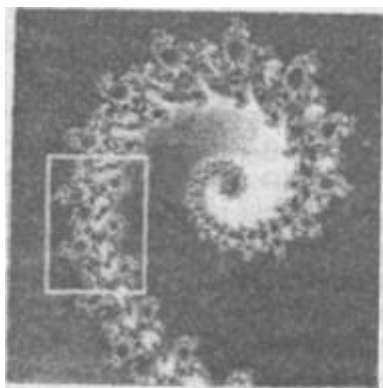
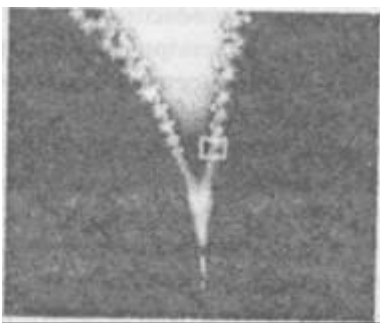
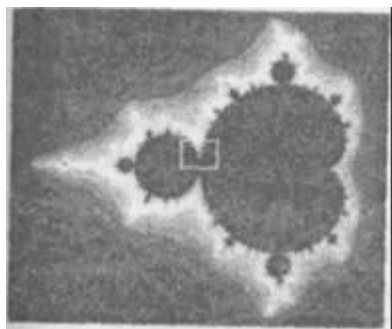
Рис. 6-19. Множество Мандельбро. Из Peitgen and Richter (1986)

Генерирование множеств Жулиа для нескольких тысяч значений c , каждое из которых складывается из тысяч точек, требующих многократных итераций, представляется невыполнимой задачей. Однако к счастью, существует мощная теорема, сформулированная самим Гастоном Жулиа, которая значительно сокращает количество необходимых шагов³⁵. Чтобы выяснить, является ли конкретное множество Жулиа связным или разделившимся, следует просто произвести итерацию для начальной точки $z = 0$. Если после нескольких итераций значение в этой точке остается конечным, т. е. имеет некоторый конечный предел, то множество Жулиа будет связным, каким бы фантастичным оно ни выглядело; если же это значение стремится к бесконечности, множество всегда будет разъединенным. Поэтому, чтобы построить множество Мандельбро, необходимо выполнить итерацию лишь в одной точке, $z = 0$, для каждого значения c . Иными словами, для построения множества Мандельбро требуется такое же количество шагов, как и для множества Жулиа.

В то время как существует бесконечное количество множеств Жулиа, множество Мандельбро уникально. Эта странная фигура представляет собой самый сложный математический объект из всех когда-либо изобретенных. И хотя правила его построения очень просты, многообразие и сложность, которые он проявляет при ближайшем рассмотрении, просто невероятны. Когда множество Мандельбро строится на фиксированной координатной сетке, на экране компьютера появляются два диска: меньший имеет относительно круглую форму, больший отдаленно напоминает очертания сердца. На каждом из двух дисков выделяется несколько небольших дискообразных наростов, расположенных вдоль границ диска, а дальнейшее повышение разрешения выявляет изобилие все более мелких наростов, напоминающих колючие шипы.

Начиная с этого момента, богатство образов, выявляемых расширением границ множества (т. е. повышением разрешающей способности вычислений), почти не поддается описанию. Такое путешествие вглубь множества Мандельбро, особенно зафиксированное на видеопленке, представляет собой незабываемый опыт³⁶. По мере того как масштаб съемки растет и изображение границы укрупняется, кажется, что прорастают побеги и усики, которые, после очередного увеличения, растворяются в огромном количестве форм — спиралей внутри спиралей, морских коньков и водоворотов, снова и снова повторяющих одни и те же паттерны (рис. 6-20).

Математика сложных систем



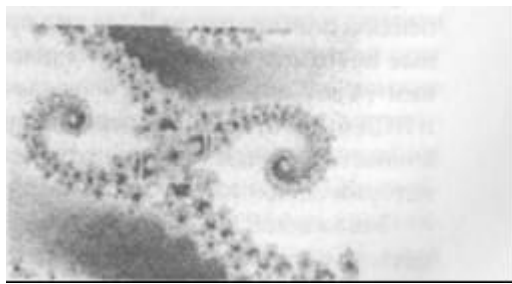


Рис. 6-20.

Стадии путешествия вглубь множества Мандельбро. На каждой фотографии область последующего увеличения помечена белой рамкой.

Из Peitgen and Richter (1986)

На каждой стадии изменения масштаба этого фантастического путешествия — в ходе которого мощности современных компьютеров обеспечивают 100 000 000-кратное увеличение! — картина напоминает причудливо изрезанное побережье; образы, изобилующие в узорах этого «побережья», удивительно напоминают органические существа во всей их бесконечной сложности. И на каждом шагу нас ждет головокружительное открытие: мы снова и снова обнаруживаем мельчайшую копию всего множества Мандельбро, глубоко запрятанную в структуре его границы.

Как только изображение множества Мандельбро появилось в августе 1985 года на обложке «*Scientific American*», сотни компьютерных энтузиастов принялись использовать итеративную программу, опубликованную в этом номере, для собственных путешествий на домашних компьютерах в дебри множества. Паттерны, обнаруженные в этих путешествиях, эффектно раскрашивались, а полученные картины публиковались в многочисленных книгах и показывались на выставках компьютерного искусства во всех уголках мира³⁷. Рассматривая эти изумительно красивые изображения закрученных спиралей, водоворотов, морских коньков, органических форм, расцветающих и превращающихся в пыль, нельзя не заметить поразительного сходства этих картин с психоделическим искусством 1960-х годов. Это было искусство, инспирированное схожими путешествиями, но содействовали им не компьютеры и новая математика, а ЛСД и другие психоделические наркотики.

Термин *психоделический* («проявляющий разум») был изобретен не случайно: подробные исследования показали, что эти наркотики действуют на человека как усилители, или катализаторы, его собственных психических процессов³⁸. Можно предположить поэтому, что фрактальные паттерны, столь поразительно проявляющиеся в ЛСД-опыте, каким-то

образом встроены в человеческий мозг. Фрактальная геометрия и ЛСД были открыты почти одновременно: это еще одно из тех *невероятных совпадений* — или синхронизмов? — которые часто происходят в истории идей.

Множество Мандельбро можно рассматривать как склад, резервуар паттернов с их бесконечными деталями и вариациями. Строго говоря, оно не самоподобно, поскольку не только снова и снова повторяет одни и те же паттерны, включая маленькие копии всего множества, но и содержит, кроме этого, элементы из бесконечного набора множеств Жулия! Таким образом, это сверхфрактал непостижимой сложности.

И вместе с тем эта структура, превосходящая своей сложностью все пределы человеческого воображения, строится на основе нескольких очень простых правил. Другими словами, фрактальная геометрия, как и теория хаоса, вынудила ученых и математиков пересмотреть само понятие сложности. В классической математике простые формулы соответствуют простым формам, сложные формулы — сложным формам. В новой математике сложных систем ситуация радикально другая. Простые уравнения могут генерировать поразительно сложные странные аттракторы, а простые правила итерации порождают структуры более сложные, чем мы можем себе представить. Мандельбро видит в этом новое волнующее направление в науке:

Это очень оптимистичный результат, потому что в конце концов изначальный смысл изучения хаоса состоял в попытке найти простые законы в окружающей нас Вселенной... Человек всегда направляет свои усилия на поиск простых объяснений для сложных реальностей. Однако контраст между простотой и сложностью никогда еще не был сравним с тем, что мы находим здесь³⁹.

Огромный интерес к фрактальной геометрии распространился далеко за пределы математического сообщества. Мандельбро видит в этом здоровое направление развития общества. Он надеется, что это положит конец изоляции математики от других видов человеческой деятельности и повсеместному игнорированию математического языка даже среди людей, в общем, высокообразованных.

Эта изоляция математики — поразительный показатель нашей интеллектуальной разобщенности, и в этом смысле она относительно нова. На протяжении нескольких веков многие великие математики вносили выдающийся вклад и в другие области. Так, в XI веке, персидский поэт Омар Хайям, всемирно известный автор *«Рубаият»*, написал, помимо этого, новаторскую книгу по алгебре и служил официальным астрономом при дворе халифа. Декарт, основатель современной философии, был блестящим математиком, а также практиковал медицину. Оба

изобретателя дифференциального исчисления, Ньютон и Лейбниц, проявляли активность и в других областях знания помимо математики. Ньютон был натурфилософом и внес фундаментальный вклад практически во все разделы науки, известные в его времена, а кроме того, в алхимию, теологию и историю. Лейбниц известен прежде всего как философ, но он также был основателем символической логики и большую часть своей жизни вел активную деятельность в качестве дипломата и историка. Великий математик Гаусс был также физиком и астрономом, изобрел несколько полезных технических устройств, в том числе электрический телеграф.

Эти примеры, к которым можно добавить не один десяток других, показывают, что на протяжении всей нашей интеллектуальной истории математика никогда не была изолирована от других сфер человеческого знания и деятельности. В XX веке, однако, прогрессирующий редукционизм, фрагментация и специализация привели к крайней степени изоляции математики даже внутри научного сообщества. Так, теоретик хаоса Ральф Эбрэм вспоминает:

Когда я начал свою профессиональную деятельность в математике в 1960 году, то есть не так уж давно, математика во всей ее полноте отвергалась физиками, включая и самых авангардных математических физиков... Было отвергнуто все, что еще год или два назад использовал Эйнштейн... Физики отказывали старшекурсникам в разрешении на посещение математических курсов, проводимых математиками: «Учитесь математике у нас. Мы научим вас тому, что вам следует знать»... Это было в 1960 году. К 1968 году ситуация изменилась полностью⁴⁰.

Великое очарование теорией хаоса и фрактальной геометрией, распространившееся среди людей, которые работают в разных областях — от ученых до менеджеров и художников, — возможно, и в самом деле свидетельствует, что изоляции математики приходит конец. В наше время новая математика сложных систем все чаще побуждает людей к осознанию того, что математика вообще — это нечто намного большее, чем сухие формулы; что понимание паттерна — необходимый путь к пониманию окружающего нас живого мира; и что все проблемы паттерна, порядка и сложности — это проблемы существенно математического характера.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 6

1. Цитируется по Сарга (1982), p. 55.

2. Цитируется по Сарга (1982), p. 63.

3. Stewart (1989), p. 38.

4. Цитируется там же, p. 51.

5. Точнее, давление — это сила, поделенная на площадь, на которую давит газ.

6. Здесь, очевидно, следует сделать техническое замечание. Математики различают зависимые и независимые переменные. В функции $y = f(x)$, y — зависимая переменная, x — независимая. Дифференциальные уравнения называются *линейными*, если все *зависимые* переменные присутствуют в них в первой степени, а *независимые* переменные могут появляться и в более высоких степенях. В *нелинейных* же уравнениях *зависимые* переменные присутствуют в степенях выше первой. См. также выше, с. 133—136.

7. См. Stewart (1989), p. 83.

8. См. Briggs and Peat (1989), p. 52ff.

9. См. Stewart (1989), p. 155ff.

10. См. Stewart (1989), pp. 95-96.

11. См. выше, с. 139—140.

12. Цитируется по Stuart (1989), p. 71.

13. Там же, p. 72; подробнее о странных аттракторах см. выше, с. 150 и далее.

14. См. Сарга (1982), p. 75ff.

15. См. Prigogine and Stengers (1984), p. 247.

16. См. Mosekilde et al. (1988).

17. См. Gleick (1987), p. 11ff.

18. Цитируется по Gleick (1987), p. 18.

19. См. Stewart (1989), p. 106ff.

20. См. выше, с. 103 и далее.

21. См. Briggs and Peat (1989), p. 84.

22. Abraham and Shaw (1982-88).

23. Mandelbrot (1983).

24. См. Peitgen et al. (1990). Эта видеокассета, содержащая великолепную компьютерную анимацию и увлекательное интервью с Бенуа Мандельбро и Эдвардом Лоренцем, может служить одним из лучших введений в фрактальную геометрию.

25.См. там же.

26.См. Peitgen et al. (1990).

27.См. Mandelbrot (1983), p. 34ff.

28.См. Dantzig (1954),p. 181 ff.

29.Цитируется по Dantzig (1954), p. 204.

30.Цитируется там же, p. 189.

31.Цитируется там же, p. 190.

32.СМ.Gleick(1987),p.221ff.

33.Легко понять, что любое число больше 1 увеличивается при каждом очередном возведении в квадрат, тогда как число меньше 1 уменьшается. Добавление константы перед возведением в квадрат на каждой ступени итерации добавляет разнообразие; для комплексных чисел вся ситуация еще более усложняется.

34.Цитируется по Gleick (1987), pp. 221-222.

35.См. Peitgen et al. (1990).

36.См. Peitgen et al. (1990).

37.См. Peitgen and Richter (1986).

38.СМ.Grof(1976).

39.Цитируется по Peitgen et al. (1990).

40.Цитируется по Gleick (1987), p. 52.

ЧАСТЬ IV

ПРИРОДА ЖИЗНИ

Глава 7

Новый синтез

Теперь мы можем вернуться к центральному вопросу этой книги: что есть Жизнь? Мой тезис заключался в том, что в настоящее время зарождается теория живых систем, совместимая с философскими основами *глубокой экологии*, включая соответствующий математический язык и немеханистическое посткартезианское понимание Жизни.

Паттерн и структура

Возникновение и уточнение понятия *паттерн организации* было исключительно важным этапом в развитии нового способа мышления. От Пифагора и Аристотеля до Гете и организменных биологов лежит непрерывная интеллектуальная традиция: ученые стремятся понять паттерн, сознавая, что это чрезвычайно важно для понимания живой формы. Александр Богданов первым попытался объединить понятия организации, паттерна и сложности в последовательную теорию систем. Кибернетики сосредоточились на паттернах связи и управления — в частности, на паттернах круговой причинности, лежащих в основе концепции обратной связи; благодаря этому, они первыми четко разграничили паттерн организации системы и ее физическую структуру.

За последние двадцать лет были найдены и проанализированы недостающие «элементы головоломки» — концепция самоорганизации и новая математика сложных систем. И снова понятие паттерна оказалось центральным в обоих этих направлениях. Концепция самоорганизации возникла из осознания сети как общего паттерна жизни; эта концепция в дальнейшем была развита Матураной и Варелой в их теории автопоэза. Новая математика сложных систем представляет собой, по существу, математику визуальных паттернов — странных аттракторов, фазовых портретов, фракталов и т. п., — которые анализируются в контексте топологической структуры, впервые разработанной Пуанкаре.

Понимание паттерна, таким образом, приобретает решающее значение в научной концепции жизни. Тем не менее при всей своей важности, для полного понимания живой системы оно недостаточно. Мы должны понять также структуру системы. Мы уже знаем, что изучение структуры было основной целью западной науки и философии и как таковое снова и снова отодвигало на второй план изучение паттерна.

Я пришел к убеждению, что ключ к построению полной теории живых систем заложен в синтезе двух подходов, т. е. в едином изучении паттерна (или формы, порядка, качества) и структуры (или вещества, материи, количества). Я буду следовать за Умберто Матураной и Франциско

Варелой в их определении этих двух ключевых критериев живой системы — ее паттерна организации и ее структуры'. *Паттерн организации* любой системы, живой или неживой, — это конфигурация взаимоотношений между компонентами системы, определяющая существенные характеристики этой системы. Другими словами, необходимо наличие определенных взаимоотношений, чтобы данный объект мог быть признан, скажем, стулом, велосипедом или деревом. Именно ту конфигурацию взаимоотношений, которая обуславливает существенные характеристики системы, мы и будем понимать как паттерн организации.

Структура системы — это физическое воплощение ее паттерна организации. Если описание паттерна организации означает абстрактное отображение взаимоотношений, то описание структуры включает характеристики реальных физических компонентов системы — их форму, химический состав и т. п. Чтобы проиллюстрировать разницу между паттерном и структурой, рассмотрим хорошо знакомую неодушевленную систему — велосипед. Для того чтобы нечто можно было назвать велосипедом, в нем должны существовать определенные функциональные взаимоотношения между компонентами, известными как рама, педали, руль, колеса, цепное колесо и т. п. Полная конфигурация этих функциональных взаимоотношений и составляет паттерн организации велосипеда. Необходимо наличие всех этих взаимоотношений, чтобы система обладала существенными характеристиками велосипеда.

Структура велосипеда представляет собой физическое воплощение его паттерна организации в виде компонентов конкретной формы, изготовленных из конкретных материалов. Один и тот же *паттерн велосипеда* может быть воплощен во множестве различных *структур велосипеда*. Рули имеют различную форму для прогулочного велосипеда, гоночного велосипеда или горного велосипеда; рама может быть тяжелой и твердой или легкой и тонкой; покрышки могут быть узкими или широкими, надувными или изготовленными из сплошной резины. Все эти комбинации и множество других легко распознаются как различные структурные воплощения одного и того же паттерна взаимоотношений, определяющего велосипед.

Три ключевых критерия

Для машины, подобной велосипеду, отдельные ее части проектируются, изготавливаются и затем собираются воедино, образуя структуру с фиксированными компонентами. В отличие от такой структуры, в живой системе компоненты непрерывно меняются. Через живой организм идет непрерывный поток материи. Каждая клетка постоянно синтезирует и растворяет структуры, а также удаляет отработанные продукты. Клетки тканей и органов заменяются в процессе непрерывных циклов. Идет рост,

развитие и эволюция. Таким образом, с самого зарождения биологии понимание живой структуры было неотделимо от понимания метаболических и эволюционных процессов².

Это поразительное свойство живых систем предполагает *процесс* как третий критерий полного описания природы жизни. *Жизненный процесс* — это деятельность, направленная на постоянное воплощение и поддержание паттерна организации системы. Таким образом, *процесс* служит связующим звеном между паттерном и структурой. В случае велосипеда, паттерн организации представлен чертежами конструкции, которые используются при изготовлении велосипеда, структура — это конкретный материальный велосипед, а связующее звено между паттерном и структурой находится в мозгу конструктора. В живом же организме паттерн организации всегда воплощен в структуре организма, а связующим звеном между паттерном и структурой служит *процесс постоянного воплощения*.

Критерий процесса завершает концептуальную структуру моего синтеза зарождающейся теории живых систем. Определения этих трех критериев — паттерна, структуры и процесса — еще раз приводятся в таблице, представленной ниже. Все три критерия полностью взаимозависимы. Паттерн организации может быть распознан только при том условии, что он воплощен в физическую структуру — а в живых системах это воплощение является непрерывным процессом. Таким образом, структура и процесс неразрывно связаны. Можно сказать, что три критерия — паттерн, структура и процесс — это три различные, но неразделимые точки зрения на феномен жизни. Они образуют три концептуальных измерения моего синтеза.

Понять природу жизни с системной точки зрения означает определить набор общих критериев, по которым можно провести четкое различие между живыми и неживыми системами. За всю историю биологии было предложено много критериев, но все они по той или иной причине оказывались неадекватными. Тем не менее последние формулировки модели самоорганизации и математика сложных систем показывают, что сегодня определить такие критерии возможно. Ключевая идея моего синтеза состоит в том, чтобы выразить эти критерии в рамках трех концептуальных измерений — паттерна, структуры и процесса.

Ключевые критерии живой системы

паттерн организации

конфигурация взаимоотношений, определяющая существенные характеристики системы

структура

физическое воплощение паттерна организации системы

жизненный процесс

деятельность, направленная на непрерывное воплощение паттерна организации системы

По сути, я предлагаю понимать автопоэз так, как Матурана и Варела определяют паттерн жизни (т. е. паттерн организации живых систем)³; диссипативную структуру — как Пригожий определяет структуру живых систем⁴; и обучение — как Грегори Бэйтсон и, более полно, Матурана и Варела определяют жизненный процесс.

Паттерн организации определяет существенные характеристики системы. В частности, он определяет, является ли система живой или нет. Автопоэз — паттерн организации живых систем — является, таким образом, определяющей характеристикой жизни в новой теории. Чтобы выяснить, относится ли данная сущность — кристалл, вирус, клетка или Земля — к живым системам, нужно определить одно: является ли ее паттерн организации автопоэзной сетью. Если да, то мы имеем дело с живой системой; если нет, то это — неживая система.

Обучение [cognition] (или процесс жизни), как мы увидим ниже, неразрывно связано с автопоэзом. Автопоэз и обучение — это два разных аспекта одного феномена жизни. По новой теории, все живые системы — это когнитивные, т. е. обучающиеся системы, а обучение всегда предполагает существование автопоэзной сети.

Что касается второго критерия жизни, структуры живых систем, то здесь ситуация несколько иная. Хотя структура живой системы всегда диссипативна, не все диссипативные структуры являются автопоэзными сетями. То есть диссипативная структура может быть либо живой, либо неживой системой. Например, клетки Бенара и химические часы, подробно исследованные Пригожиным, являются диссипативными структурами, но не живыми системами⁵.

Три ключевых критерия жизни, вместе с теориями, лежащими в их основе, будут подробно рассмотрены в последующих главах. Здесь я даю лишь предварительный краткий обзор.

Автопоэз — паттерн жизни

Уже в первой четверти столетия было известно, что паттерн организации живой системы всегда является сетевым паттерном⁶. Однако мы знаем также, что не всякая сеть представляет живую систему. Согласно Матуране и Вареле, определяющей особенностью живой сети служит то, что она непрерывно производит саму себя. Таким образом, «бытие и творение [живых систем] неразделимы, и в этом заключается специфика их организации»⁷. Автопоэз, или «самосоздание», — это сетевой паттерн, в котором каждый компонент сети участвует в создании или трансформации других компонентов. Таким образом, сеть непрерывно производит, создает

саму себя. Она создается своими компонентами и, в свою очередь, создает эти компоненты.

Простейшей из известных нам живых систем является клетка, и Матурана и Варела широко использовали биологию клетки при изучении характеристик автопоэзных сетей. Базовый паттерн автопоэза удобно проиллюстрировать на примере клетки растения. На рис. 7-1 изображена упрощенная картина такой клетки: здесь компонентам даны наглядные условные названия. Соответствующие специальные термины, произведенные из греческого и латинского, читатель найдет в словаре, приведенном ниже.

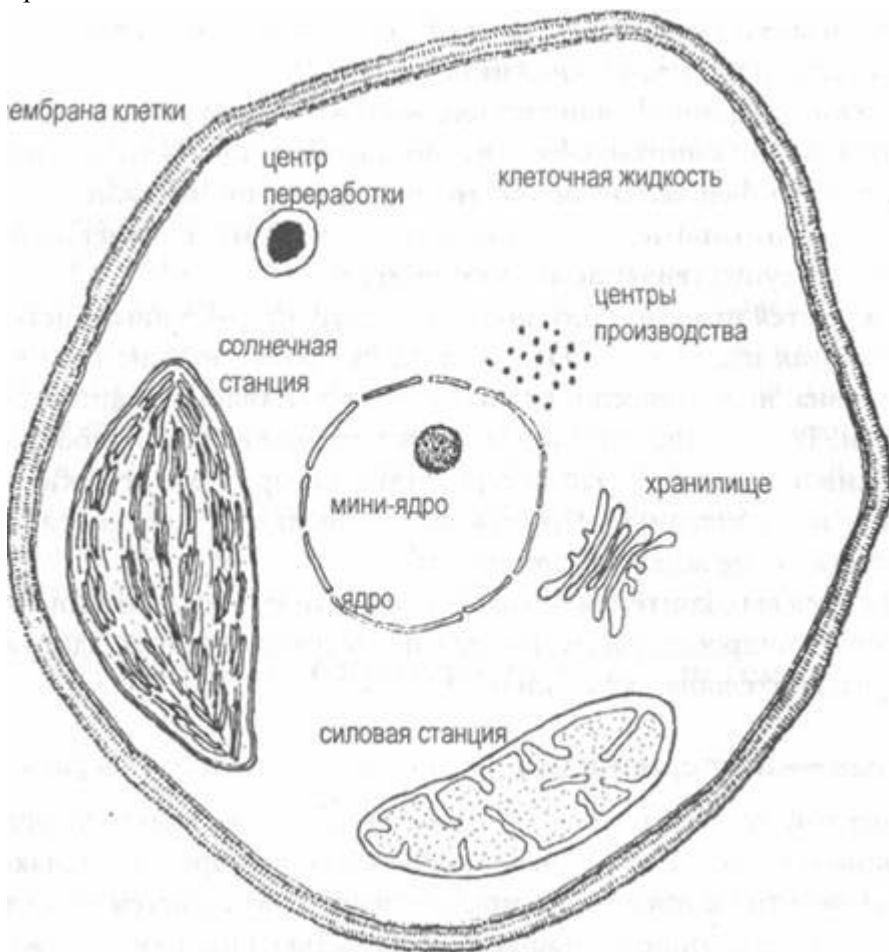


Рис. 7-1. Основные компоненты клетки растения

Типичная растительная клетка, как и любая другая, состоит из клеточной мембраны, в которой помещается клеточная жидкость.

Жидкость представляет собой густой молекулярный раствор питательных веществ клетки, т. е. химических элементов, из которых клетка строит свои структуры. В клеточной жидкости мы обнаруживаем во взвешенном состоянии ядро клетки, а также большое количество центров производства, где изготавливаются основные структурные строительные блоки, и несколько специализированных частей, называемых «органеллами» — поскольку они аналогичны органам тела. Наиболее важными из этих органелл являются хранилище, центры переработки, силовые и солнечные станции. Как и клетка в целом, ядро и органеллы окружены полупроницаемыми мембранами, которые выборочно пропускают определенные вещества внутрь и наружу. Мембрана клетки, в частности, выпускает питательные вещества и рассеивает отходы.

Ядро клетки содержит генетический материал — молекулы ДНК, несущие генетическую информацию, и молекулы РНК, которые производятся ДНК и доставляют инструкции в центры производства⁸. В ядре содержится меньшее «мини-ядро», где создаются производственные центры, которые затем распределяются по всей клетке.

Словарь технических терминов

клеточная жидкость — *цитоплазма* («клеточная жидкость») мини-ядро — *ядрышко*

центр производства — *рибосома*; состоит из *рибонуклеиновой кислоты* (РНК) и *микросомы* («микроскопического тела») и представляет собой крошечную гранулу, содержащую ДНК

хранилище — *аппарат Гольджи* (назван по имени итальянского физика Камилло Гольджи)

центр переработки — *лизосома* («растворяющее тело») силовая станция — *митохондрия* («нитевидная гранула»)

носитель энергии — *аденозинтрифосфат* (АТФ), химическое соединение, состоящее из основы, Сахаров и фосфатов

солнечная станция — *хлоропласт*, фотосинтезирующее органическое вещество («зеленый лист»)

Центры производства представляют собой гранулярные тела, в которых производятся протеины клетки. Последние включают структурные протеины, а также ферменты — катализаторы, содействующие всем молекулярным процессам. В каждой клетке содержится около 500 000 центров производства.

Хранилища — это склады плоских мешочков, уложенных примерно как лепешки хлеба-лаваша; здесь хранятся, а затем маркируются, упаковываются и рассылаются по местам назначения различные

клеточные продукты.

Центры переработки — это органеллы, в которых содержатся ферменты для переваривания пищи, поврежденные компоненты клетки и различные неиспользованные молекулы. Испорченные элементы здесь перерабатываются и используются для построения новых компонентов клетки.

Силовые станции выполняют дыхательные функции клетки, т. е. используют кислород для разложения органических молекул на углекислый газ и воду. Отсюда исходит энергия, которая концентрируется в специальных энергетических носителях. Эти энергетические носители представляют собой сложные молекулярные соединения, которые перемещаются к другим частям клетки и снабжают энергией все клеточные процессы, именуемые в совокупности *клеточным метаболизмом*. Энергетические носители служат основными энергетическими единицами клетки, примерно как деньги в человеческой экономике.

Только недавно было обнаружено, что силовые станции содержат собственный генетический материал и делятся независимо от деления клетки. Согласно теории Линн Маргулис, они происходят от простых бактерий, которые поселились в более сложных и крупных клетках примерно два миллиарда лет тому назад⁹. С тех пор они стали непременными резидентами во всех высших организмах, передаются от поколения к поколению и живут в тесном симбиозе с любой клеткой.

Как и силовые станции, солнечные станции имеют собственный генетический материал и самовоспроизводятся, но они содержатся лишь в зеленых растениях. Это центры фотосинтеза, преобразующие солнечную энергию, углекислый газ и воду в сахара и кислород. Произведенные сахара отправляются в силовые станции, где из них извлекается энергия, которая может затем храниться в энергетических носителях. В дополнение к сахарам, растения поглощают также питательные вещества и некоторые другие элементы из земли с помощью корней.

Очевидно, что даже для весьма грубого представления о внутриклеточной организации необходимо достаточно сложное описание компонентов клетки; сложность неизмеримо возрастает, когда мы пытаемся представить огромную сеть этих компонентов и их взаимосвязи, означающие тысячи метаболических процессов. Одни только ферменты образуют запутанную сеть каталитических реакций, поддерживающих все метаболические процессы; чтобы обеспечивать их горючим, соответствующую энергетическую сеть составляют энергетические носители. На рис. 7-2 еще раз изображена упрощенная схема клетки растения, но на этот раз стрелками показаны некоторые важнейшие связи в

сети метаболических процессов.

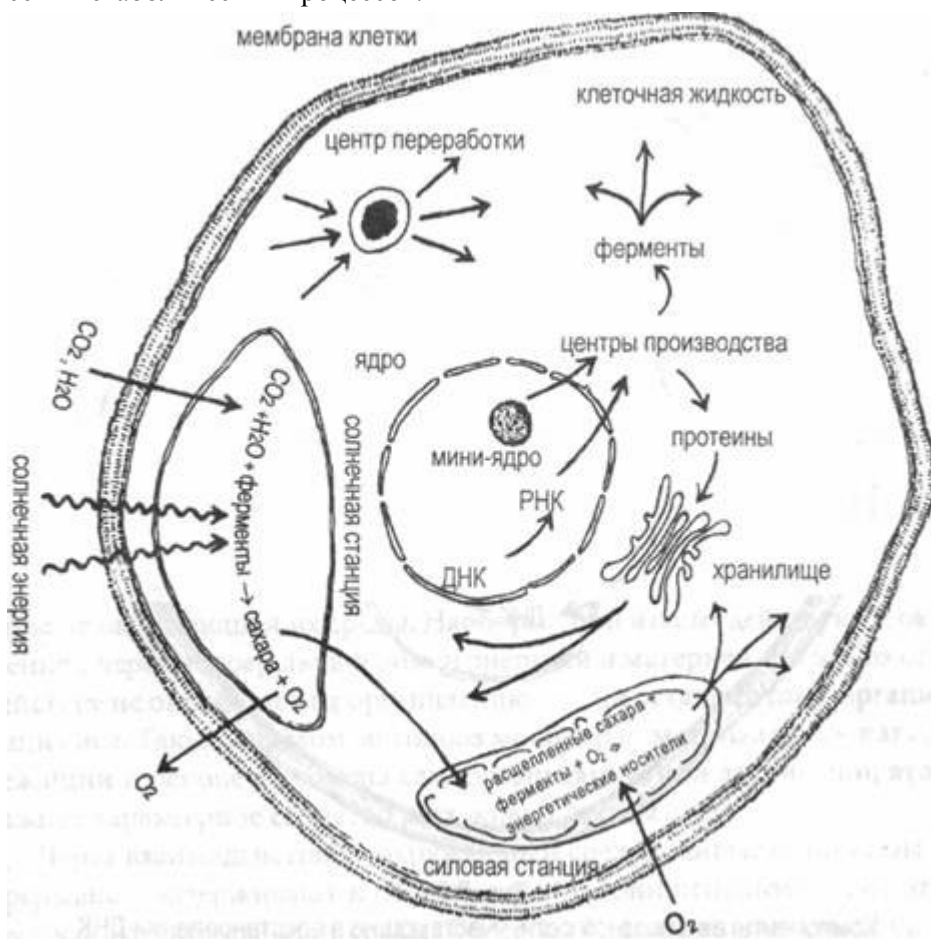


Рис. 7-2. Метаболические процессы в клетке растения

Чтобы проиллюстрировать природу этой сети, рассмотрим только одну петлю. ДНК в ядре клетки производит молекулы РНК, которые содержат инструкции для производства протеинов, включая ферменты. Среди последних есть группа специальных ферментов, которые могут распознавать, устранять и заменять поврежденные участки ДНК¹⁰. На рис. 7-3 представлена схема некоторых взаимоотношений в такой петле. ДНК производит РНК, которая доставляет инструкции по производству ферментов в центры производства ферментов; произведенные ферменты проникают в ядро клетки и там восстанавливают ДНК. Каждый компонент этой небольшой сети участвует в производстве или преобразовании других компонентов; эта сеть, таким образом, явно обладает признаками автопоэза: ДНК производит РНК; РНК определяет ферменты; а ферменты

восстанавливают ДНК.

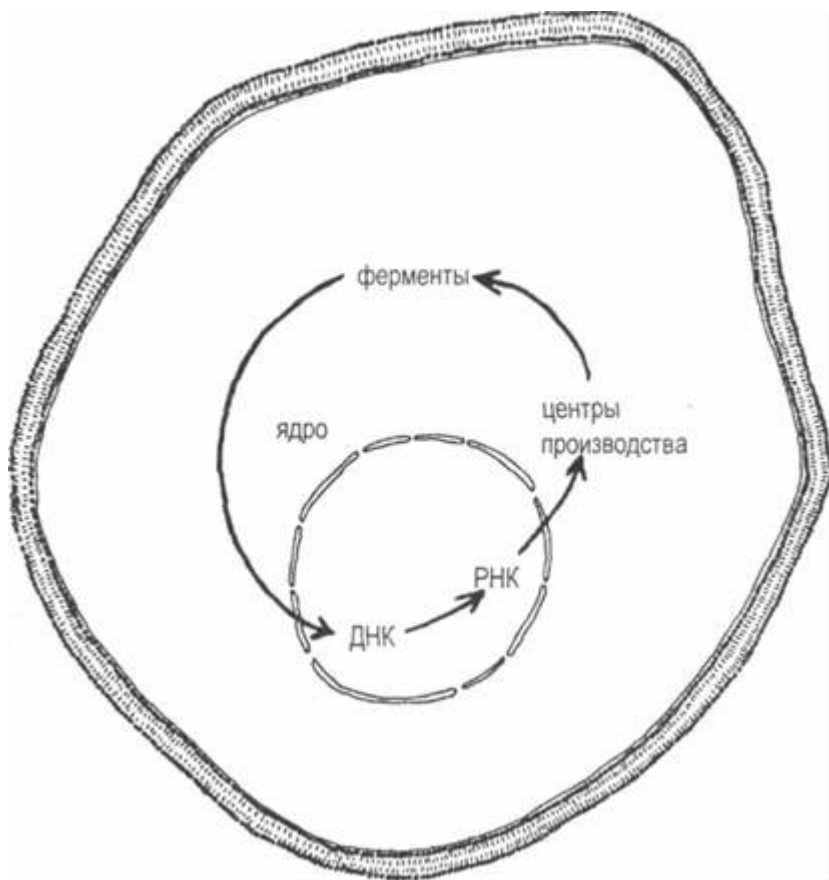


Рис. 7-3. Компоненты автопоэзной сети, участвующие в восстановлении ДНК

Чтобы завершить картину, необходимо добавить строительные блоки, из которых построены ДНК, РНК и ферменты; энергетические носители, подающие топливо для всех изображенных процессов; генерацию энергии на силовых станциях на основе расщепленных Сахаров; производство Сахаров в процессе фотосинтеза на солнечных станциях; и т. д. и т. п. С каждым новым добавлением мы убеждаемся, что новые компоненты также помогают производить или трансформировать другие компоненты и что, таким образом, автопоэзная, самосозидающая природа всей сети становится все более очевидной.

Особенно интересна клеточная мембрана. Это граница клетки, образованная некоторыми компонентами клетки; она охватывает всю сеть

метаболических процессов и тем самым ограничивает их распространение. Вместе с тем мембрана участвует в этой же сети: с помощью специальных фильтров она отбирает сырье для процессов производства (пищу клетки), а отходы производства выводит во внешнюю среду. Таким образом, автопоэзная сеть создает свою собственную *границу*, которая определяет клетку как отчетливую систему и в то же время сама остается активной частью сети.

Поскольку каждый компонент автопоэзной сети производится другими компонентами этой же сети, вся система *организационно закрыта*; вместе с тем она открыта по отношению к потоку энергии и материи. Организационная закрытость означает, что живая система является самоорганизующейся в том смысле, что ее порядок и поведение не обусловлены окружением, но устанавливаются самой системой. Другими словами, живые системы автономны. Это не означает, что они изолированы от окружающей их среды. Наоборот, они взаимодействуют с окружением через непрерывный обмен энергией и материей. Но это взаимодействие не определяет их организацию — они остаются самоорганизующимися. Таким образом, автопоэз можно рассматривать как паттерн, лежащий в основе феномена самоорганизации, или автономии; это — важное характерное свойство всех живых систем.

Через взаимодействие с окружающей средой живые организмы непрерывно поддерживают и обновляют себя; они используют для этого ресурсы из окружающей среды. Более того, постоянное самосоздание включает также способность формировать новые структуры и новые паттерны поведения. Мы увидим, что создание новизны, приводящее к развитию и эволюции, является глубоким внутренним аспектом автопоэза.

Тонкий, но важный момент в определении автопоэза составляет тот факт, что автопоэзная сеть — это не набор отношений между статическими *компонентами* (каковым, например, является паттерн организации кристалла), но набор отношений между *процессами воспроизводства* компонентов. Если эти процессы останавливаются, останавливается и вся организация. Другими словами, автопоэзные сети должны непрерывно регенерировать себя, чтобы поддерживать собственную организацию. Это, конечно, хорошо известная особенность жизни.

Матурана и Варела видят в различии между взаимоотношениями статических компонентов и взаимоотношениями процессов ключевую разницу между физическими и биологическими феноменами. Поскольку процессы в биологическом феномене включают компоненты, из них всегда можно извлечь описание этих компонентов в чисто физических терминах. Тем не менее, как утверждают авторы, такое чисто физическое описание

не охватывает биологический феномен в полной мере. Биологическое объяснение, утверждают они, должно быть описанием взаимоотношений процессов в контексте автопоэза.

Диссипативная структура — структура живых систем

Описывая паттерн жизни как автопоэзную сеть, Матурана и Варела делают основной акцент на организационной закрытости этого паттерна. Когда структуру живой системы описывает Илья Пригожин, он, наоборот, уделяет главное внимание открытости этой структуры потоку энергии и материи. Таким образом, живая система как открыта, так и закрыта — она открыта структурно, но закрыта организационно. Через систему непрерывно протекает поток материи, но она поддерживает устойчивую форму и обеспечивает это автономно посредством самоорганизации.

Чтобы подчеркнуть это кажущееся парадоксальным сосуществование изменений и устойчивости, Пригожин ввел термин «диссипативные структуры». Я уже упоминал, что не все диссипативные структуры являются живыми системами, и, чтобы наглядно показать сосуществование непрерывного потока и структурной устойчивости, удобнее обратиться к простым, неживым диссипативным структурам. Одна из простейших структур такого типа — завихрение в потоке воды, например, водоворот в сливном отверстии ванны. Вода непрерывно проходит сквозь водоворот, и все же его характерная форма, хорошо известные спирали и сужающаяся воронка остаются замечательно устойчивыми (рис. 7-4). Это — диссипативная структура.

Более близкое рассмотрение источника и прохождения такого водоворота вскрывает ряд достаточно сложных феноменов". Представьте себе ванну с неглубокой и неподвижной водой. Когда сток открывается, вода начинает вытекать, образуя радиальный поток в направлении стока и ускоряясь под влиянием гравитационной силы по мере приближения к сливному отверстию. Таким образом, устанавливается плавный, единый поток. Однако плавное состояние потока удерживается недолго.



Рис. 7-4 Воронка при сливе воды в ванной

Мелкие нерегулярности в движении воды, движении воздуха над поверхностью воды и возмущения в трубе стока приведут к тому, что с одной стороны стока окажется немного больше воды, чем с другой, и тогда в потоке появляется вихревой, круговой компонент движения. По мере того как частицы воды движутся вниз в направлении стока, их радиальная и круговая скорости нарастают. Радиально они ускоряются под действием силы гравитации, а скорость вращения возрастает оттого, что уменьшается радиус вращения: так фигуристка ускоряет обороты, прижимая руки к телу при выполнении пируэта¹². В результате частицы воды движутся вниз по спиральным траекториям, образуя сужающуюся трубку линий потока, известную как *воронка*.

Так как основной поток все еще радиален и направлен к центру, воронка непрерывно сдавливается под напором воды со всех сторон. Это давление уменьшает ее радиус и еще больше ускоряет вращение. Используя язык Пригожина, можно сказать, что вращение вносит неустойчивость в изначально однородный поток. Сила тяготения, давление воды и постоянно уменьшающийся радиус воронки — все это, вместе взятое, непрерывно ускоряет вихревое движение жидкости.

Это непрерывное ускорение завершается, однако, не катастрофой, а новым устойчивым состоянием. По достижении определенной скорости вращения в игру вступают центробежные силы: они отталкивают воду от стока по радиусу. Как результат, на изначально плоской поверхности воды над стоком образуется углубление, которое быстро превращается в воронку. В конце концов внутри водоворота формируется миниатюрный воздушный торнадо, а на водной поверхности воронки возникают достаточно сложные нелинейные структуры — барашки, волны и завихрения.

Через некоторое время сила тяготения, влекущая воду вниз в направлении стока, давление воды, направленное внутрь потока, и центробежные силы, расталкивающие поток в стороны, уравниваются друг друга; устанавливается устойчивое состояние, в котором тяготение поддерживает поток энергии высокого уровня, а трение рассеивает некоторую небольшую ее часть. Действующие силы теперь взаимосвязаны через самобалансирующиеся петли обратной связи, которые обеспечивают устойчивость структуре водоворота в целом.

Подобные высокоустойчивые диссипативные структуры образуются иногда во время грозы при особых атмосферных условиях. Ураганы и торнадо представляют собой вихри бешено вращающегося воздуха; они могут перемещаться на огромные расстояния и высвобождать разрушительные силы, не проявляя значительных изменений в структуре

своего вихря. Подробности процессов в этих атмосферных вихрях гораздо богаче, чем в случае воронки воды в ванной, поскольку здесь появляется несколько новых факторов — разница температур, расширение и сжатие воздуха, эффекты влажности, конденсация и испарение и т. п. Соответственно, гораздо более сложными и разнообразными, чем в водоворотах, оказываются структуры воздушных вихрей и режимы их поведения. Грозы могут превращаться в диссипативные структуры характерных размеров и форм; при особых условиях некоторые из них даже разделяются на два отдельных урагана.

Метафорически мы можем представить себе и живую клетку как некий вихрь, т. е. устойчивую структуру, которую постоянно пронизывает поток материи и энергии. Но силы и процессы, действующие в клетке, совершенно другие и гораздо более сложные, чем в вихре. Если балансирующие силы в вихре имеют механический характер, причем доминирует сила тяготения, то соответствующие силы в клетке — химической природы. Точнее говоря, именно каталитические петли в автопозной сети клетки действуют как самобалансирующиеся петли обратной связи.

Подобным же образом, источник неустойчивости в водовороте носит механический характер и возникает как следствие начального вращательного импульса, а в клетке существуют различные типы неустойчивости, и их природа — химическая, а не механическая. Они тоже берут начало в каталитических циклах, составляющих главную особенность всякого метаболического процесса. Важнейшим свойством этих циклов является то, что они действуют не только как самобалансирующие, но и как самоусиливающие петли обратной связи, способные толкать систему все дальше и дальше от равновесия, пока она не достигнет порога устойчивости. Этот порог называется *тонкой бифуркацией*, или точкой неустойчивости; в таких точках могут спонтанно возникать новые формы порядка, полагая начало развитию и эволюции.

Математически точка бифуркации представляет резкое изменение траектории системы в фазовом пространстве¹³. Внезапно может появиться новый аттрактор — и поведение всей системы идет в новом направлении. Тщательное изучение Пригожиным точек бифуркации выявило еще некоторые замечательные свойства диссипативных структур, о чем пойдет речь в следующей главе¹⁴.

Диссипативные структуры, формируемые водоворотами или ураганами, могут поддерживать свою устойчивость лишь до тех пор, пока через структуру проходит устойчивый поток материи из окружающей среды. Точно так же, живая диссипативная структура, например организм, нуждается в постоянном проходящем сквозь систему потоке воздуха, воды

и пищи из окружающей среды, чтобы оставаться живой и поддерживать свой порядок. Обширная сеть метаболических процессов поддерживает систему в далеком от равновесия состоянии и, через содержащиеся в ней петли обратной связи, вызывает бифуркации, обеспечивая тем самым развитие и эволюцию.

Обучение — процесс жизни

Три ключевых критерия жизни — паттерн, структура и процесс — так неразрывно переплетены, что трудно обсуждать их отдельно; вместе с тем, необходимо понимать и различия между ними. Автопоэз, паттерн жизни, — это набор взаимоотношений между *процессами* производства; а диссипативная структура может быть понята только в контексте метаболических и эволюционных *процессов*. Таким образом, процессуальное измерение присуще критерию как паттерна, так и структуры.

В зарождающейся теории живых систем процесс жизни — как непрерывное воплощение автопоэзного паттерна организации в диссипативной структуре — идентифицируется с обучением, процессом познания. Это предполагает радикально новую концепцию разума, которая, возможно, является самым революционным и волнующим аспектом этой теории, поскольку обещает наконец полностью преодолеть картезианское разделение разума и материи.

Согласно теории живых систем, разум — это не вещь, а процесс, сам процесс жизни. Другими словами, организационная деятельность живых систем на всех уровнях жизни — это деятельность умственная. Взаимодействие живого организма — растения, животного или человека — с окружающей его средой есть взаимодействие познавательное, или ментальное. Так жизнь и познание становятся неразрывно связанными. Разум — или, более точно, ментальный процесс — имманентен материи на всех уровнях жизни.

Новая концепция разума была разработана, независимо друг от друга, Грегори Бэйтсоном и Умберто Матураной в 60-е годы. Бэйтсон, постоянный участник конференций Мэйси в ранние годы кибернетики, стал пионером в применении системного мышления и кибернетических принципов в нескольких новых областях¹⁵. В частности, он разработал системный подход к душевным заболеваниям и кибернетическую модель алкоголизма, а в результате пришел к определению *ментального процесса* как системного феномена, характерного для живых организмов.

Бэйтсон сформулировал ряд критериев, которым удовлетворяет система, обладающая разумом¹⁶. Любая система, отвечающая этим критериям, способна развивать процессы, которые мы ассоциируем с разумом, — обучение, память, принятие решений и т. п. По Бэйтсону,

разум — это необходимое и неизбежное следствие определенной сложности, возникающей задолго до того, как в организме формируется мозг и центральная нервная система. Он также подчеркивал, что разум свойствен не только индивидуальным организмам, но также социальным и экологическим системам.

Впервые Бэйтсон представил свою новую концепцию ментального процесса в 1969 году в докладе на конференции по душевному здоровью, проходившей на Гавайях¹⁷. В том же году Матурана представил другую формулировку той же основной идеи на конференции по обучению, организованной Хайнцом фон Форстером в Чикаго¹⁸. Так два ученых, находившихся под сильным влиянием кибернетики, одновременно пришли к одной революционной концепции разума. Тем не менее их методы радикально различались, как и их язык, на котором они описывали свое новаторское изобретение.

Бэйтсон мыслил преимущественно категориями паттернов и отношений. Его основная цель, как и цель Матураны, состояла в том, чтобы найти паттерн организации, общий для всех живых существ. «Какой паттерн, — спрашивал он, — связывает краба с омаром, орхидею с примулой и всех их со мной? И меня с тобой?»¹⁹

Бэйтсон считал, что для точного описания природы нужно попытаться говорить на языке природы, а это и есть, как он подчеркивал, *язык взаимоотношений*. Взаимоотношения, по Бэйтсону, это самая сущность живого мира. Биологическая форма складывается из отношений, а не из частей; Бэйтсон настаивал, что это же относится и к способу человеческого мышления. Поэтому он назвал книгу, в которой изложил свою концепцию ментального процесса, *«Разум и природа: необходимое единство»*.

Бэйтсон обладал уникальной способностью улавливать тончайшие природные феномены в состоянии сосредоточенного наблюдения. Это не было обычное научное наблюдение. Каким-то образом он умел наблюдать растение или животное всем своим существом, с симпатией и страстью. И когда он говорил о растении, он описывал его с любовью и с мельчайшими деталями, используя язык, которым, по его убеждению, сама природа говорит об общих принципах — а он извлекает их из своего непосредственного контакта с растением. Его трогала красота, проявляемая в сложности паттернов природных взаимоотношений, и описание этих паттернов доставляло ему настоящее эстетическое наслаждение.

Бэйтсон разработал критерии ментального процесса интуитивно, лишь на основе своего пристального наблюдения над живым миром. Ему было очевидно, что феномен разума неразрывно связан с феноменом жизни.

Всматриваясь в живой мир, он видел, что организационная деятельность этого мира по своему существу ментальна. По его собственным словам, «разум — это суть живого бытия»²⁰.

Несмотря на ясное понимание единства разума и жизни — или разума и природы, как он выражался, — Бэйтсон никогда не спрашивал, «что есть жизнь». Он никогда не ощущал потребности в разработке теорий или моделей живой системы, которые составили бы концептуальную основу для его критериев ментального процесса. Разработка именно такой основы была научной целью Матураны.

По совпадению — или по интуиции? — Матурана одновременно бился над двумя вопросами, которые, как ему казалось, толкают его в противоположных направлениях: «Какова природа жизни?» и «В чем суть обучения?»²¹. В конце концов он обнаружил, что ответ на первый вопрос — автопоэз — обеспечивает ему теоретическую основу для ответа на второй. Результатом явилась системная теория обучения, разработанная Матураной и Варелой; иногда ее называют *теорией Сантьяго*.

Главное положение теории Сантьяго, как и теории Бэйтсона, — тождество обучения (процесса познания) с процессом жизни²². Это положение радикально расширяет традиционную концепцию разума. По теории Сантьяго, для существования разума мозг отнюдь не необходим. У бактерии или растения нет мозга, но есть разум. Простейшие организмы способны к восприятию и, следовательно, к обучению. Они не видят, но тем не менее воспринимают перемены в окружающей среде — различие между светом и тенью, жарой и холодом, высокой и низкой концентрацией некоторых химических веществ и т. п.

Таким образом, новое понимание обучения, или процесса познания, гораздо шире, чем понятие мышления. В него входят восприятие, эмоции и деятельность — весь процесс Жизни. В мире людей обучение также включает язык, понятийное мышление и все другие атрибуты человеческого сознания. Общее понятие, однако, гораздо шире и может даже не включать мышление.

Теория Сантьяго, по моему мнению, обеспечивает первое последовательное научное мировоззрение, действительно преодолевающее картезианский раскол. Разум и материя более не представляются двумя изолированными категориями, но рассматриваются как различные аспекты, различные измерения единого феномена Жизни.

Чтобы проиллюстрировать концептуальный прогресс, выраженный этим единым взглядом на Разум, Материю и Жизнь, следует вернуться к вопросу, который более ста лет смущал ученых и философов. Как взаимоотносятся между собой Разум и мозг? Нейробиологи еще в XIX веке знали, что структуры мозга и ментальные функции тесно связаны между

собой, однако подробности взаимоотношений между Разумом и мозгом всегда оставались тайной. Еще в 1994 году издатели антологии «Сознание в философии и когнитивная нейробиология» честно признавались в предисловии: «Хотя все и согласны с тем, что Разум имеет некоторое отношение к мозгу, все еще не существует общего согласия по поводу конкретной природы этой взаимосвязи»²³.

В теории Сантьяго взаимоотношения между разумом и мозгом просты и ясны. Наконец-то отброшена декартовская характеристика разума как мыслящей вещи (*res cogitans*). Разум — не вещь, а процесс, процесс обучения, тождественный процессу Жизни. Мозг — специфическая структура, посредством которой разум осуществляет свою деятельность. Взаимосвязь между Разумом и мозгом, таким образом, представляет собой взаимосвязь между процессом и структурой.

Мозг, конечно, не единственная структура, с помощью которой осуществляется процесс обучения. Вся диссипативная структура организма участвует в процессе обучения, независимо от того, обладает ли организм мозгом и центральной нервной системой. Более того, недавние исследования убедительно показали, что в организме человека нервная, иммунная и эндокринная системы, которые традиционно рассматривались как три изолированные системы, фактически формируют единую когнитивную сеть²⁴.

Новый синтез Разума, Материи и Жизни, который будет подробно рассмотрен в последующих главах книги, включает два концептуальных обобщения. Взаимозависимость *паттерна* и *структуры* позволяет объединить два подхода к пониманию Природы, которые были раздельными и конкурировали на протяжении всей истории западной науки и философии. Взаимозависимость *процесса* и *структуры* позволяет ликвидировать разрыв между Разумом и Материей, который тормозил науку со времен Декарта. Взятые вместе, эти два обобщения обеспечивают три взаимозависимых концептуальных измерения нового научного понимания Жизни.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 7

1. Maturana and Varela (1987), p. 47. Вместо «паттерна организации» авторы просто используют термин «организация».

2. См. выше, с. 34— 35.

3. См. выше, с. 112 и далее.

4. См. выше, с. 103 и далее.

5. См. выше, с. 103— 106.

6. См. выше, с. 99— 100.

7. Maturana and Varela (1980), p. 49.

8. См. Capra (1982), p. 119.

9. См. ниже, с. 263.

10. Чтобы осуществлять это, ферменты используют другую, дополнительную цепочку ДНК в качестве шаблона для заменяемой секции. Таким образом, двойная цепочка ДНК весьма существенна для этих восстановительных процессов.

11. Я благодарен Вильяму Холлоуэю за исследовательскую поддержку в работе над феноменом водоворота.

12. Говоря техническим языком, этот эффект является следствием сохранения углового момента.

13. См. выше, с. 154— 155.

14. См. ниже, с. 208— 209.

15. См. выше, с. 72— 73.

16. Бэйтсон сначала опубликовал обсуждение этих критериев, изначально названных «ментальными характеристиками»; его можно найти в двух эссе, «The Cybernetics of Self: A Theory of Alcoholism» и «Pathologies of Epistemology», оба напечатаны в Bateson (1972). Более детальное обсуждение см. в Bateson (1979), p. 89ff. Более подробное обсуждение бэйтсоновских критериев ментального процесса см. ниже, Приложение, с. #305 и далее.

17. См. Bateson (1972), p. 478.

18. См. выше, с. 113— 114.

19. Bateson (1979), p. 8.

20. Цитируется по Capra (1988), p. 88.

21. См. выше, с. 112— 114.

22. См. ниже, с. 285 и далее.

23. Revonsuo and Kamppinen (1994), p. 5.

24. См. ниже, с. 302 и далее.

Глава 8

ДИССИПАТИВНЫЕ СТРУКТУРЫ

Структура и изменение

С самых ранних дней становления биологии философы и ученые заметили, что живые формы самыми на первый взгляд загадочными способами сочетают устойчивость структуры с гибкостью изменений. Как вихри, они зависят от постоянного потока материи, проходящего сквозь них; как пламя, они преобразуют материалы, которыми питаются, чтобы поддерживать свою деятельность и расти; но, помимо всего этого и в отличие от вихря и пламени, живые структуры совершенствуются, размножаются и эволюционируют.

Еще в 40-е годы Людвиг фон Берталанфи назвал живые структуры *открытыми системами*, чтобы подчеркнуть их зависимость от непрерывных потоков энергии и ресурсов. Он ввел термин *Fliessgleichgewicht* («текущее равновесие»), чтобы отразить сосуществование равновесия и потока, структуры и изменения — во всех формах жизни¹. Теперь экологи изображают экосистемы в виде схем потоков, отмечая пути прохождения энергии и материи в различных пищевых сетях. Такие исследования показывают, что круговая переработка является ключевым принципом экологии. Будучи открытыми системами, все организмы в экосистеме производят отходы, но то, что является отходами для одного вида, служит пищей для другого, поэтому все отходы непрерывно перерабатываются и экосистема в целом, в самом общем итоге, существует без отходов.

Зеленые растения играют жизненно важную роль в потоке энергии, пронизывающем все экологические циклы. Корни выбирают из земли воду и минеральные соли, которые в виде соков поднимаются к листьям и там соединяются с углекислым газом (CO_2), поступающим из воздуха; так образуются сахара и другие органические соединения (в их число входит и целлюлоза — главный структурный элемент стенок клетки). В ходе этого чудесного процесса, известного как фотосинтез, солнечная энергия преобразуется в химическую и связывается в органических веществах, в то время как кислород освобождается и снова поступает в воздух, откуда его потребляют другие растения и животные в процессе дыхания.

Соединяя воду и минералы с солнечным светом и CO_2 , зеленые растения тем самым связывают землю и небо. Мы привыкли считать, что деревья и травы вырастают из земли, но на самом деле большая часть их вещества происходит из воздуха. Основной объем целлюлозы и других органических соединений, образующихся в процессе фотосинтеза, состоит из тяжелых атомов углерода и кислорода; именно эти элементы растения забирают прямо из воздуха в форме CO_2 . Таким образом, вес полена почти

целиком «набран» из воздуха. Когда полено сгорает в камине, кислород и углерод опять соединяются в CO_2 и мы получаем — в виде света и тепла — часть солнечной энергии, которая была затрачена на производство дерева.

На рис. 8-1 изображена схема типичного пищевого цикла. По мере того как растения поедаются животными, которых, в свою очередь, поедают другие животные, питательные вещества растений проходят по пищевым сетям, а энергия рассеивается в виде тепла через дыхание и выделения. Отходы, а также мертвые животные и растения перерабатываются так называемыми «разлагающими организмами» (насекомыми и бактериями): в ходе этой переработки из отходов освобождаются первоначальные (базовые) питательные вещества и их снова поглощают зеленые растения. Таким образом, питательные вещества и другие основные элементы непрерывно циркулируют по всей экосистеме, причем энергия рассеивается на каждой стадии. Так осуществляется афоризм Юджина Одума: «Материя циркулирует, энергия рассеивается»². Единственным отходом экосистемы в целом оказывается тепловая энергия дыхания: она рассеивается в атмосфере и непрерывно пополняется через фотосинтез за счет солнечного излучения.

Наша иллюстрация, конечно, сильно упрощена. Реальные пищевые циклы могут быть поняты только в контексте гораздо более сложных пищевых паутин, в которых первоначальные, базовые питательные элементы представлены многими химическими соединениями. В последние годы наши знания в области пищевых паутин значительно расширились и усовершенствовались благодаря Гайя-теории, которая показывает сложное переплетение живых и неживых систем во всей биосфере — растений и камней, зверей и атмосферных газов, микроорганизмов и океанов.

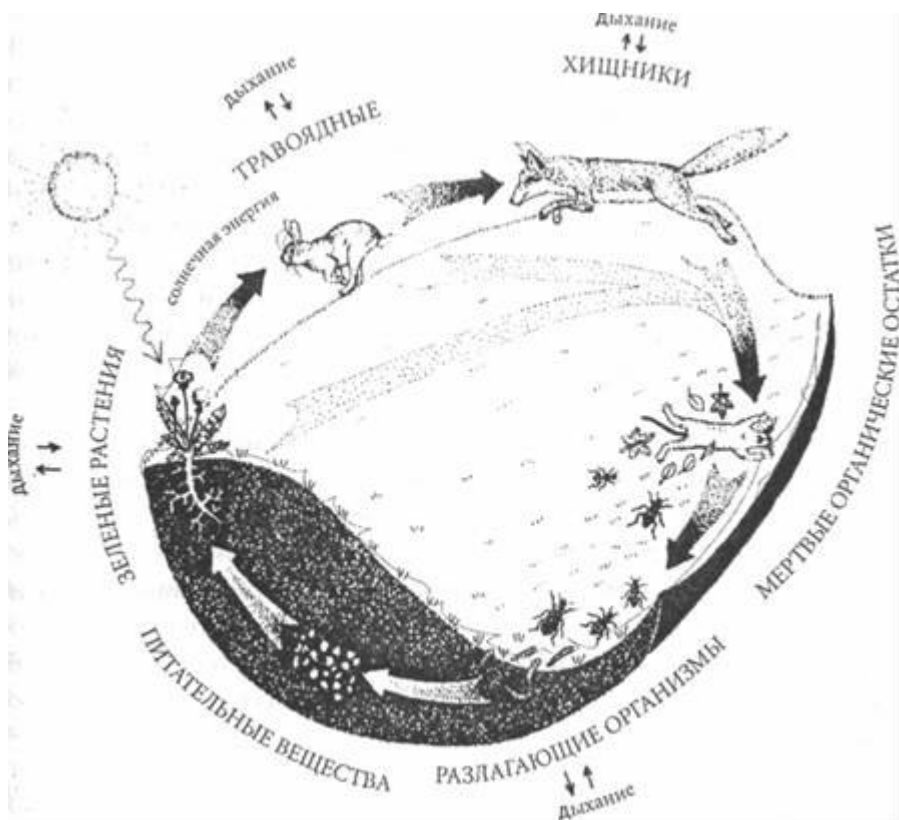


Рис. 8-1. Типичный пищевой цикл

Более того, поток питательных веществ через организмы экосистемы не всегда однороден и гладок, но часто сопровождается импульсами, перепадами и разливами. По словам Пригожина и Стенгерс, «энергетический поток, который пересекает [организм], чем-то напоминает реку, которая большей частью течет спокойно, но время от времени устремляется вниз водопадом, высвобождая часть содержащейся в ней энергии»³.

Понимание живых структур как открытых систем было важным новым подходом, который, однако, не решил загадку сосуществования структуры и изменения, порядка и рассеяния, пока Илья Пригожий не сформулировал свою теорию диссипативных структур⁴. Как Берталанфи объединил понятия потока и равновесия для описания открытых систем, так и Пригожий объединил «диссипацию» (рассеяние) и «структуру», чтобы выразить две кажущиеся противоречивыми тенденции, которые сосуществуют во всех живых системах. Однако концепция диссипативных структур Пригожина идет гораздо дальше теории открытых систем, поскольку включает также представление о точках неустойчивости, в

которых могут возникать новые структуры и новые формы порядка.

Теория Пригожина связывает главные характеристики живых форм в последовательную концептуальную и математическую модель, которая предполагает радикальный пересмотр многих фундаментальных идей, касающихся структуры, — переносит акцент от устойчивости к неустойчивости, от порядка к неупорядоченности, от равновесия к неравновесным состояниям, от бытия к становлению. В центре мировоззрения Пригожина лежит сосуществование структуры и изменения, «покоя и движения»; он изящно поясняет это ссылкой на древнюю скульптуру:

Каждый великий период науки предполагал некоторую модель природы. Для классической науки это были часы; для XIX века, периода Промышленной Революции, это был глохнущий мотор. Какой же символ изберем мы? Наше разумение может быть выражено ссылкой на скульптуру — от индейского, доколумбового искусства до наших времен. В самых прекрасных произведениях скульптуры, будь то танцующий Шива или миниатюрные храмы Герреро, отчетливо проявляется стремление соединить покой с движением, время остановленное с временем уходящим. Мы убеждены, что это противоречие подарит нашему времени свою неповторимость⁵.

Неравновесные состояния и нелинейность

Ключ к пониманию диссипативных структур лежит в осознании того, что они поддерживают себя в устойчивом состоянии, далеко от равновесия. Эта ситуация настолько отличается от феномена, описываемого классической наукой, что мы сталкиваемся с трудностями традиционного языка. Словарные определения понятия «устойчивый» включают «фиксированный», «не колеблющийся» и «неизменный» — все они неадекватно описывают диссипативные структуры. Живой организм характеризуется непрерывным потоком и изменениями в обмене веществ, включающем тысячи химических реакций. Химическое и тепловое равновесие наступает тогда, когда все эти процессы прекращаются. Другими словами, организм в состоянии равновесия — это мертвый организм. Живые организмы непрерывно поддерживают себя в далеком от равновесия состоянии, которое, по сути, есть состояние жизни. Сильно отличаясь от равновесия, это состояние, тем не менее, сохраняет устойчивость в течение продолжительных периодов времени, что означает, как и в случае вихря, что поддерживается одна общая структура, несмотря на непрекращающийся поток и изменение компонентов.

Пригожий понял, что классическая термодинамика — первая наука, трактующая сложные системы, — не подходит для описания далеких от

равновесия систем из-за линейной природы ее математической структуры. Ближе к состоянию равновесия — в диапазоне классической термодинамики — находятся процессы типа *потока*, однако они *слабы*. Система всегда развивается в сторону стационарного состояния, в котором генерация энтропии (или беспорядка) сведена к минимуму. Другими словами, система минимизирует свои потоки, функционируя предельно близко к состоянию равновесия. В этом диапазоне потоковые процессы могут быть описаны линейными уравнениями.

Чем дальше от равновесия, тем потоки становятся сильнее, увеличивается выработка энтропии, и тогда система больше не стремится к равновесию. Наоборот, здесь уже могут встретиться неустойчивости, ведущие к новым формам порядка, которые отодвигают систему все дальше и дальше от состояния равновесия. Другими словами, вдали от равновесия диссипативные структуры могут развиваться в формы все более возрастающей сложности.

Пригожин подчеркивает, что характеристики диссипативной структуры не могут быть выведены из свойств ее частей, но обусловлены «сверхмолекулярной организацией»⁶. Корреляции дальнего типа проявляются как раз в точке перехода от равновесия к неравновесному состоянию, и, начиная с этого момента, система ведет себя как единое целое.

Вдали от равновесия потоковые процессы в системе взаимосвязаны через многочисленные петли обратной связи, а соответствующие математические уравнения нелинейны. Чем дальше диссипативная структура от равновесия, тем выше степень сложности и нелинейности описывающих ее математических уравнений.

Учитывая критическую связь между неравновесным состоянием и нелинейностью, Пригожий и его коллеги разработали нелинейную термодинамику для далеких от равновесия систем, используя для этого аппарат теории динамических систем — новую математику сложных систем, которая тогда только начинала развиваться⁷. Линейные уравнения классической термодинамики, как отмечал Пригожий, можно анализировать с помощью точечных аттракторов. Какими бы ни были начальные условия системы, она «увлекается» к стационарному состоянию с минимальной энтропией, предельно близко к равновесию, и ее поведение полностью предсказуемо. Как выражается Пригожий, системы в линейном диапазоне «склонны забывать свои начальные условия»⁸.

За пределами линейного диапазона ситуация совершенно другая. Нелинейные уравнения, как правило, имеют больше чем одно решение; чем выше степень нелинейности, тем больше решений. Это означает, что новые ситуации могут возникать в любой момент. Говоря математическим

языком, система в этом случае попадает в точку бифуркации, где может отклониться в совершенно другое состояние. Далее мы увидим, что поведение системы в точке бифуркации (т. е. по какому из нескольких возможных направлений она пойдет) зависит от предыдущей истории системы. В нелинейном диапазоне начальные условия уже «не забываются».

Кроме того, теория Пригожина показывает, что поведение далекой от равновесия диссипативной структуры не подчиняется ни одному из универсальных законов: оно уникально для данной системы. Вблизи точки равновесия мы находим повторяющиеся феномены и универсальные законы. По мере удаления от равновесия, мы движемся от универсального к уникальному, в направлении богатства и разнообразия. Это, конечно, хорошо известная характеристика жизни.

Наличие точек бифуркации, в которых система может пойти по любому из нескольких различных направлений, предполагает, что неопределенность является еще одной характеристикой теории Пригожина. В точке бифуркации система может сделать «выбор» — этот термин здесь используется метафорически — между несколькими возможными направлениями, или состояниями. Какое направление она выберет, будет зависеть от истории системы и различных внешних условий и никогда не может быть предсказано. В каждой точке бифуркации существует неустранимый элемент случайности.

Неопределенность в точках бифуркации представляет собой один из двух типов непредсказуемости в теории диссипативных структур. Другой тип, характерный также для теории хаоса, обусловлен высокой степенью нелинейности уравнений и проявляется даже тогда, когда бифуркации отсутствуют. Из-за многократных петель обратной связи — или, математически, многократных итераций — мельчайшая погрешность в вычислениях, вызванная практической необходимостью определенного округления цифр, неизбежно значительно повышает степень неопределенности, делая предсказания невозможными⁹.

Как неопределенность в точках бифуркации, так и неопределенность «хаотического типа» из-за повторяющихся итераций предполагают, что поведение диссипативной структуры может быть предсказано лишь на короткий промежуток времени. После этого системная траектория ускользает от нас. Таким образом, теория Пригожина, как квантовая теория и теория хаоса, еще раз напоминает нам, что научное знание обесценивает не более чем «ограниченное окно во вселенную»¹⁰.

Стрела времени

По Пригожину, признание неопределенности как ключевой характеристики естественных феноменов является частью серьезного

пересмотра научной концептуальности. Тесно связан с этим концептуальный сдвиг и в научных представлениях о необратимости и времени.

В механистической парадигме ньютоновской науки мир рассматривался как полностью причинный и детерминированный. Все, что происходило, имело определенную причину и приводило к определенному следствию. Будущее любой части системы, равно как и ее прошлое, в принципе, могло быть рассчитано с абсолютной определенностью, если состояние этой системы в любой данный момент времени известно во всех подробностях. Этот строгий детерминизм нашел свое самое яркое выражение в знаменитых словах Пьера-Симона Лапласа:

Интеллект, который в данное мгновение знает все силы, действующие в природе, и положение всех вещей, из которых состоит мир, — буде сей интеллект достаточно обширен, дабы подвергнуть эти данные анализу, — единой формулой охватит движения громадных тел во вселенной и мельчайшие передвижения атомов; ничто не вызовет у него сомнения, и будущее, равно как и прошлое, предстанет его взору¹¹.

В этом лапласианском детерминизме не делается различия между прошлым и будущим. И то и другое заложено в настоящем состоянии мира и в ньютоновых уравнениях движения. Все процессы здесь строго обратимы. Будущее и прошлое чередуются, здесь нет места истории, новаторству или творчеству.

Необратимые эффекты (например, трение) отмечались в классической ньютоновской физике, но ими всегда пренебрегали. В XIX столетии ситуация изменилась решительным образом. С изобретением тепловых двигателей необратимость рассеяния энергии при трении, вязкость (сопротивление жидкости течению) и тепловые потери оказались в центре внимания новой науки термодинамики, которая выдвинула идею *стрелы времени*. В это же время геологи, биологи, философы и поэты начали размышлять над изменением, ростом, развитием и эволюцией. Философия XIX столетия глубоко интересовалась природой становления.

В классической термодинамике необратимость, при всей своей важности как понятия, всегда ассоциировалась с рассеянием энергии и потерями. Пригожий фундаментально изменил такой подход в своей теории диссипативных структур, показав, что в живых системах, функционирующих вдали от равновесия, необратимые процессы играют конструктивную и важную роль.

Химические реакции — базовые процессы жизни — являются примером необратимых процессов. В ньютоновском мире не может быть ни химии, ни жизни. Теория Пригожина показывает, как каталитические

петли — особого типа химические процессы, исключительно важные для живых организмов¹², — приводят к состояниям неустойчивости через многократную усиливающую обратную связь и как в последовательных точках бифуркации возникают структуры постоянно нарастающей сложности. «Необратимость, — заключает Пригожий, — есть механизм извлечения порядка из хаоса»¹³.

Таким образом, концептуальный сдвиг в науке, предложенный Пригожиным, означает переход от детерминированных, обратимых процессов к неопределенным, необратимым. Поскольку необратимые процессы играют значительную роль в химии и жизни, при всем том что взаимозаменяемость будущего и прошлого является неотъемлемой частью физики, похоже, что пригожинский пересмотр концепций должен рассматриваться в более широком контексте — том самом, который обсуждался в начале этой книги в связи с глубокой экологией как часть сдвига научной парадигмы от физики к наукам о жизни¹⁴.

Порядок и беспорядок

Стрела времени, как она представляется в классической термодинамике, не указывает на возрастающий порядок, она направлена в противоположную сторону. Согласно второму закону термодинамики, физические феномены проявляют тенденцию к движению от порядка к беспорядку, в сторону непрерывно возрастающей энтропии¹⁵. Одно из величайших достижений Пригожина состоит в разрешении парадокса двух противоречивых взглядов на эволюцию — физического и биологического: один представляет идею глохнущего мотора, другой описывает мир, эволюционирующий в сторону возрастающего порядка и сложности. По словам самого Пригожина, «Вот вопрос, преследующий нас более ста лет: какое значение имеет эволюция живого существа в мире, описанном термодинамикой, т. е. в мире непрерывно нарастающего беспорядка?»¹⁶

По теории Пригожина, второй закон термодинамики все еще верен, но взаимосвязь между энтропией и беспорядком уже видится в новом свете. Чтобы усвоить это новое представление, нам следует рассмотреть классические определения энтропии и порядка. Концепция энтропии как меры рассеяния энергии на тепло и трение была представлена в XIX веке Рудольфом Клаузиусом, немецким физиком и математиком. Клаузиус определил энтропию, создаваемую в тепловом процессе, как рассеянную энергию, деленную на температуру, при которой происходит процесс. Согласно второму закону термодинамики, энтропия нарастает, по мере того как продолжается тепловой процесс; рассеянная энергия никогда не может быть восстановлена, а направление в сторону непрерывно нарастающей энтропии определяет стрелу времени.

Хотя рассеяние энергии на тепло и трение — общеизвестное и

привычное явление, сразу же после формулировки второго закона возник интригующий вопрос: что конкретно вызывает эту необратимость? В ньютоновской физике эффектами трения, как правило, пренебрегали, считая их не слишком существенными. Тем не менее эти эффекты *можно* учитывать и в ньютоновской системе. В принципе, утверждали ученые, можно использовать ньютоновы законы движения для описания рассеяния энергии на молекулярном уровне в форме каскадов столкновений. Каждое из этих столкновений — обратимое событие, поэтому нет ничего невозможного в том, чтобы запустить этот процесс в обратном направлении. Тогда получается, что рассеяние энергии, необратимое на макроскопическом уровне и отвечающее второму закону и обычному опыту, состоит из полностью обратимых событий на микроскопическом уровне. Где же здесь, в таком случае, вкрадывается необратимость?

В начале века эта тайна была разгадана австрийским физиком Людвигом Больцманом, одним из великих теоретиков классической термодинамики. Больцман вложил новый смысл в понятие энтропии и установил связь между энтропией и порядком. Следуя рассуждениям основателя статистической механики Джеймса Кларка Максвелла¹⁷, Больцман предложил простой мысленный эксперимент, позволяющий исследовать энтропию на молекулярном уровне¹⁸.

Представьте, что у нас есть коробка, рассуждал Больцман, разделенная на два равных отсека воображаемой перегородкой в центре, и восемь различных молекул, пронумерованных от единицы до восьми подобно бильiardным шарам. Сколько существует способов такого распределения этих частиц в коробке, чтобы их определенное количество находилось по левую сторону перегородки, а остальные — по правую?

Для начала поместим все восемь частиц в левый отсек. Это можно сделать лишь одним способом. Если же мы решим поместить семь частиц налево, а одну — направо, то получим восемь способов, так как единственной частицей в правом отсеке может быть любая из восьми частиц. Поскольку молекулы различны, эти восемь способов представляют собой различные комбинации. Подобным же образом, существует 28 различных комбинаций для шести частиц слева и двух справа.

Для всех этих перестановок легко вывести общую формулу¹⁹. Из нее следует, что количество способов увеличивается по мере того, как уменьшается разность между числом частиц слева и справа, достигая максимума (70 различных комбинаций) при равном распределении молекул, по четыре на каждой половине (рис. 8-2).

Больцман называл различные комбинации *комплексиями* и связывал их с понятием порядка — чем меньше комплексий, тем выше порядок. Таким образом, в нашем примере первое состояние со всеми восемью частицами

на одной стороне отражает самую высшую степень порядка, тогда как равное распределение с четырьмя частицами на каждой стороне представляет максимальный беспорядок.

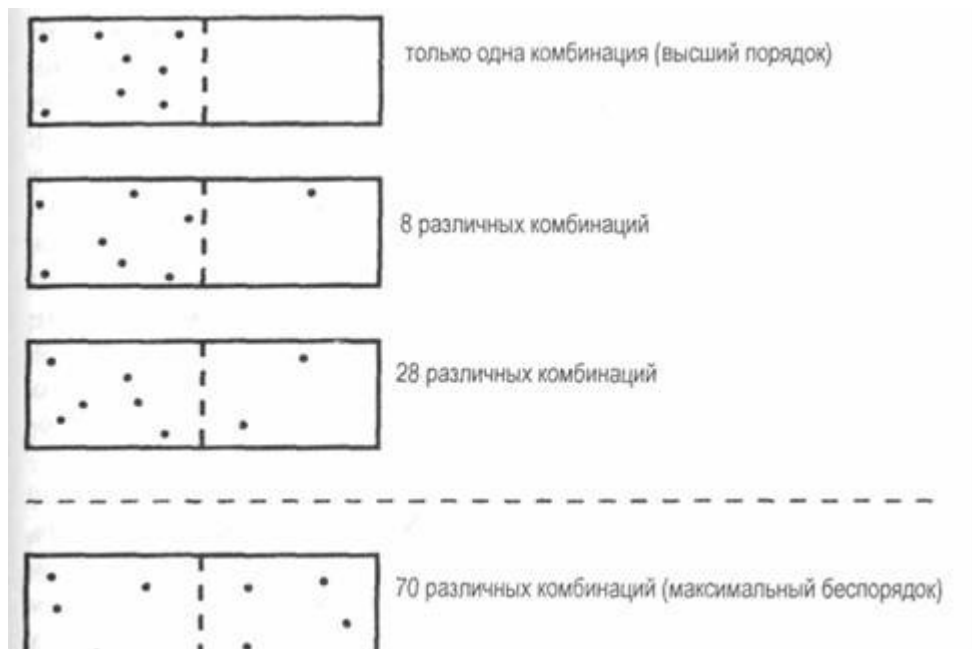


Рис. 8-2. Мысленный эксперимент Больцмана

Важно подчеркнуть, что концепция порядка, представленная Больцманом, — это концепция *термодинамическая*: молекулы находятся в непрерывном движении. В нашем примере перегородка коробки чисто воображаемая, и молекулы в своем беспорядочном движении свободно проходят сквозь нее. В разные моменты времени газ находится в различных состояниях, т. е. количество молекул в отсеках коробки бывает различным; и для каждого из этих состояний число комплексов связано с его степенью порядка. Это термодинамическое определение порядка совершенно отлично от жестких представлений о порядке и равновесии в ньютоновской механике.

Рассмотрим другой пример больцмановской концепции порядка, более близкий к нашему повседневному опыту. Представьте, что мы наполняем мешок двумя видами песка — нижнюю половину черным песком, а верхнюю белым. Это состояние высокого порядка; здесь существует лишь одна возможная комплексия. Затем мы встряхиваем мешок, чтобы смешать частицы песка. По мере того как белый и черный песок смешиваются все

больше и больше, число возможных комплексов возрастает, а вместе с ней и степень беспорядка, пока мы не получим однородную смесь, состоящую из серого песка, — и максимальный беспорядок.

Введя такое определение порядка, Больцман смог анализировать поведение молекул в газе. Используя статистические методы, разработанные Максвеллом для описания беспорядочного движения молекул, Больцман отметил, что число возможных комплексов любого состояния является мерой вероятности того, что газ окажется в этом состоянии. Вот как определяется вероятность. Чем больше комплексов существует для определенной комбинации, тем больше вероятность того, что это состояние установится в газе при беспорядочном движении молекул.

Таким образом, число возможных комплексов для определенной комбинации молекул измеряет как степень порядка этого состояния, так и вероятность его установления. Чем выше число комплексов, тем больше беспорядок и выше вероятность того, что газ окажется в этом состоянии. Так Больцман пришел к выводу, что движение от порядка к беспорядку есть движение от менее вероятного состояния к более вероятному. Выражая энтропию и беспорядок через число комплексов, он ввел определение энтропии на языке вероятностных представлений.

Согласно Больцману, не существует физического закона, который запрещал бы движение от беспорядка к порядку, но, в силу беспорядочного движения молекул, такое направление весьма маловероятно. Чем больше молекул, тем выше вероятность движения от порядка к беспорядку, а при огромном количестве частиц в газе, эта вероятность практически превращается в определенность. Когда вы трясете мешок с белым и черным песком, вы *можете* наблюдать, как два типа песчинок разделяются прямо-таки волшебным способом, образуя высокоупорядоченное состояние полного разделения. Но вам, вероятней всего, придется трясти мешок в течение нескольких миллионов лет, чтобы это событие произошло.

На языке Больцмана второй закон термодинамики означает, что любая закрытая система стремится к максимально вероятному состоянию, которое представляет собой состояние максимального беспорядка. На математическом языке это состояние может быть определено как аттракторное состояние теплового равновесия. Как только равновесие достигнуто, система, скорее всего, не будет стремиться его покинуть.

Временами беспорядочное движение молекул может создавать различные состояния, но они близки к равновесию и существуют лишь в течение коротких периодов времени. Другими словами, система просто флуктуирует (беспорядочно колеблется) вокруг состояния теплового

равновесия.

Классическая термодинамика, таким образом, пригодна для описания феноменов в состоянии равновесия или близком к равновесию. Пригожинская теория диссипативных структур, напротив, применима к далеким от равновесия термодинамическим феноменам, когда молекулы находятся не в беспорядочном движении, но взаимосвязаны через многочисленные петли обратной связи, описываемые нелинейными уравнениями. В этих уравнениях уже не доминируют точечные аттракторы, а это означает, что система более не стремится к равновесию. Диссипативная структура поддерживает себя вдали от равновесия и может даже уходить все дальше и дальше от него через последовательные бифуркации.

В точках бифуркации состояния высшего порядка (в больцмановском смысле) могут возникать спонтанно. Тем не менее это не противоречит второму закону термодинамики. Полная энтропия системы продолжает увеличиваться, но это увеличение энтропии не эквивалентно сплошному увеличению беспорядка. В живом мире порядок и беспорядок всегда создаются одновременно.

По Пригожину, диссипативные структуры — это островки порядка в море беспорядка, поддерживающие и даже повышающие свой порядок за счет увеличения беспорядка в окружающей среде. Например, живые организмы забирают упорядоченные структуры (пищу) из окружающей среды, используют их как ресурсы для своих метаболических процессов и рассеивают их как структуры низшего порядка (отходы). Как говорит сам Пригожий, «порядок парит в беспорядке»; при этом общая энтропия продолжает возрастать в соответствии со вторым законом термодинамики²⁰.

Это новое представление о порядке и беспорядке радикально переворачивает традиционные научные понятия. В классическом понимании, для которого физика является первоисточником концепций и метафор, порядок эквивалентен равновесию, как, например, в кристаллах и других статических структурах, а беспорядок — неравновесным состояниям, таким как вихри. Новая наука сложных систем, черпающая вдохновение из паутины жизни, показывает, что неравновесное состояние — это источник порядка. Турбулентные потоки воды и воздуха, выглядя хаотическими, на самом деле обладают высокой организацией и сложными паттернами, в которых вихри делятся снова и снова во все более мелких масштабах. В живых системах порядок, возникающий из неравновесных состояний, еще более очевиден; он выражает себя в богатстве, разнообразии и красоте жизни вокруг нас. Во всем живом мире хаос преобразуется в порядок.

Точки неустойчивости

Точки неустойчивости, в которых происходят непредсказуемые драматические события, где спонтанно возникает порядок и разворачивается скрытая ранее сложность, представляют, вероятно, самый интригующий и замечательный аспект теории диссипативных структур. До Пригожина единственным типом неустойчивости, который изучался более или менее подробно, была турбулентность, вызываемая внутренним трением текущей жидкости или газа²¹. Леонардо да Винчи провел множество тщательных исследований турбулентных потоков. В XIX веке был поставлен ряд экспериментов, которые показали, что любой поток воды или воздуха становится турбулентным при достаточно высокой скорости — т. е. при достаточно большом «удалении» от равновесия (неподвижного состояния).

Исследования Пригожина показали, что для химических реакций это неверно. Химическая неустойчивость не возникает автоматически вдали от равновесия. Для этого необходимы каталитические петли: они подводят систему к точке неустойчивости через многократную усиливающую (положительную) обратную связь²². В этих процессах объединяются два различных феномена — химические реакции и диффузия (физический поток молекул, вызванный разностью концентраций). Соответственно, описывающие их нелинейные уравнения называются *уравнениями реакции-диффузии*. Они формируют математическую основу теории Пригожина, позволяющую описывать поразительный диапазон типов поведения²³.

Британский биолог Брайан Гудвин весьма остроумным способом применил пригожинский математический аппарат для моделирования стадий развития весьма специфичной одноклеточной водоросли²⁴. Составив дифференциальные уравнения, которые связывают между собой паттерны концентрации кальция в клеточной жидкости водоросли и механические свойства стенок клетки, Гудвин и его коллеги сумели обнаружить петли обратной связи в процессе самоорганизации, когда в последовательных точках бифуркации появляются структуры нарастающего порядка.

Точка бифуркации — это порог устойчивости, где диссипативная структура может либо разрушиться, либо прорваться к одному из нескольких новых состояний порядка. Что на самом деле происходит в этой критической точке, зависит от предыдущей истории системы. В зависимости от того, каким путем она достигла точки неустойчивости, она направится по той или иной ветке после точки бифуркации.

Эта важная роль истории диссипативной структуры в критических точках ее развития, обнаруженная Пригожиным даже в простых

химических колебаниях, похоже, является физическим началом характерной для всех живых систем связи между структурой и историей. Живая структура, как мы увидим ниже, всегда является *записью* своего предыдущего развития²⁵.

В точке бифуркации диссипативная структура также проявляет исключительную чувствительность к малейшим флуктуациям в окружающей среде. Незначительное случайное отклонение, часто называемое «шумом», может определить выбор направления. Поскольку все живые системы существуют в непрерывно флуктуирующей среде и поскольку невозможно узнать, какое отклонение произойдет в точке бифуркации в «тот самый» момент, мы никогда не можем предсказать будущее направление развития системы.

Таким образом, все детерминистские описания оказываются несостоятельными, когда диссипативная структура проходит точку бифуркации. Ничтожные отклонения в окружающей среде предопределяют выбор ветви, по которой эта структура последует. И поскольку в некотором смысле именно эти случайные отклонения приводят к возникновению новых форм порядка, Пригожий ввел описательный термин *порядок через флуктуации*.

Уравнения теории Пригожина — детерминистские уравнения. Они управляют поведением системы на отрезках между точками бифуркации; то касается точек неустойчивости, то здесь решающими оказываются флуктуации — небольшие случайные отклонения. Таким образом, «процессы самоорганизации в далеких от равновесия условиях соответствуют тонкому взаимодействию между случайностью и необходимостью, между флуктуациями и детерминистскими законами»²⁶.

Новый диалог с природой

Концептуальный сдвиг, предполагаемый теорией Пригожина, включает несколько тесно взаимосвязанных идей. Описание диссипативных структур, которые существуют вдали от равновесия, требует нелинейного математического аппарата, способного моделировать множественные взаимосвязанные циклы обратной связи. В живых организмах, это каталитические циклы (т. е. нелинейные, необратимые химические процессы), которые приводят к точкам неустойчивости через повторяющуюся самоусиливающую обратную связь. Когда диссипативная структура достигает такой точки неустойчивости, называемой точкой бифуркации, в теории появляется элемент неопределенности. В точке бифуркации поведению системы свойственна непредсказуемость. В частности, здесь могут спонтанно возникнуть новые структуры высшего порядка и сложности. Таким образом, самоорганизация, спонтанное возникновение порядка, служит результатом комплексного эффекта

неравновесия, необратимости, циклов обратной связи и неустойчивости.

Радикальный характер подхода Пригожина очевиден и вытекает из того факта, что к этим фундаментальным идеям редко обращались в традиционной науке, и часто с ними были связаны негативные коннотации. Это следует из самого языка, на котором их описывали. Неравновесный, нелинейность, неустойчивость, неопределенность и т. п. — все это негативные формулировки. Пригожин убежден в том, что этот концептуальный сдвиг, подразумеваемый теорией диссипативных структур, не только критичен для понимания учеными природы жизни, но также помогает нам более полно интегрировать себя в природу.

Многие из ключевых характеристик диссипативных структур — чувствительность к малым изменениям в окружающей среде, важность предыдущей истории в критических точках выбора, неопределенность и непредсказуемость будущего — представляются революционными концепциями с точки зрения классической науки, однако служат интегральной частью человеческого опыта. Поскольку диссипативные структуры — это базовые структуры всех живых систем, включая и человеческие существа, это, очевидно, не должно вызывать удивления.

Вместо того чтобы быть машиной, природа в целом оказывается более подобной человеку — непредсказуемая, чувствительная к окружающему миру, подверженная влиянию малейших отклонений. Соответственно, адекватный подход к природе с целью изучения ее сложности и красоты состоит не в господстве и контроле, но в уважении, кооперации и диалоге. Действительно, Илья Пригожин и Изабель Стенгерс снабдили свою популярную книгу «Порядок из хаоса» подзаголовком «Новый диалог человека с Природой».

В детерминистском мире Ньютона нет места истории и творчеству. В живом мире диссипативных структур история играет важную роль, будущее неопределенно, и эта неопределенность служит основой творчества. «Сегодня, — размышляет Пригожин, — мир, который мы видим снаружи, и мир, который мы ощущаем внутри, сближаются. Это сближение двух миров — вероятно, одно из наиболее важных культурных событий нашего века»²⁷.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 8

1. См. выше, с. 65. 2. Odum (1953).
3. Prigogine and Stengers (1984), p. 156.
4. См. выше, с. 103.
5. Prigogine and Stengers (1984), pp. 22-23.
6. Там же, pp. 143-144.
7. См. выше, с. 131.
8. Prigogine "and Stengers (1984), p. 140.
9. См. выше, с. 144.
10. Prigogine (1989).
11. Цитируется по Capra (1975), p. 45.

12. Я использовал общий термин «каталитические петли (циклы)» для обозначения множества сложных нелинейных взаимоотношений между катализаторами, включая автокатализ, перекрестный катализ и самоторможение. Более подробно см. Prigogine and Stengers (1984), p. 153.

13. Prigogine and Stengers (1984), p. 292.

14. См. выше, с. 28.

15. См. выше, с. 63— 64.

16. Prigogine and Stengers (1984), p. 129.

17. См. выше, с. 139— 140.

18. См. Prigogine and Stengers (1984), p. 123-124.

19. Если N — общее количество частиц, N_i — частицы на одной стороне, а N_2 — на другой, то число различных возможностей определяется формулой

$P = N! / N! \times N!$, где $N!$ — факториал N , т. е. $1 \times 2 \times 3 \dots \times N$.

20. Prigogine (1989).

21. См. Briggs and Peat (1989), p. 45ff.

22. См. Prigogine and Stengers (1984), p. 144ff.

23. См. Prigogine (1980), p. 104ff.

24. Goodwin (1994), p. 89ff.

25. См. ниже, с. 238.

26. Prigogine and Stengers (1984), p. 176.

27. Prigogine (1989).

Глава 9

Самосозидание

Клеточные автоматы

Когда Илья Пригожий разрабатывал свою теорию диссипативных структур, он искал простейшие примеры, которые можно было бы описать математически. Он нашел их в каталитических циклах химических колебаний, также известных как «химические часы»¹. Это не живые системы, однако те же типы каталитических циклов лежат в основе метаболизма клетки, простейшей из известных живых систем. Поэтому модель Пригожина позволяет нам объяснить существенные структурные особенности клеток на языке диссипативных структур.

Умберто Матурана и Франциско Варела следовали подобной стратегии, когда они разрабатывали теорию автопоэза — паттерна организации живых систем². Они задавали себе вопрос: какое простейшее воплощение автопоэзной сети можно описать математически? Как и Пригожин, они обнаружили, что даже простейшие клетки слишком сложны для математической модели. С другой стороны, они понимали, что поскольку паттерн автопоэза является определяющей характеристикой живой системы, то в природе не найти автопоэзной системы проще, чем клетка. Поэтому, отказавшись от поисков естественной автопоэзной системы, они решили смоделировать ее в виде компьютерной программы.

Их подход был аналогичен модели Мира маргариток, разработанной Джеймсом Лавлоком несколькими годами позже³. Однако там, где Лавлока интересовала простейшая математическая модель планеты с биосферой, регулирующей собственную температуру, Матурана и Варела искали простейшую модель сети клеточных процессов, воплощающей автопоэзный паттерн организации. Это означало, что им нужно было разработать особую компьютерную программу: она должна моделировать такую сеть процессов, в которой функция каждого компонента состоит в том, чтобы помогать созданию или трансформации других компонентов сети. Как и в случае клетки, эта автопоэзная сеть также должна создавать собственную границу, которая составляет часть сети процессов, но в то же время определяет ее протяженность.

Чтобы найти подходящий математический аппарат для своей задачи, Франциско Варела изучил математические модели самоорганизующихся сетей, разработанные в кибернетике. Двоичные сети, изобретенные Мак-Каллоком и Питтсом в 40-е годы, не обеспечивали достаточного уровня сложности для моделирования автопоэзной сети⁴; однако оказалось, что более поздние модели сетей — так называемые «клеточные автоматы» — идеально подходят для этой цели.

Клеточный автомат представляет собой прямоугольную решетку, состоящую из правильных квадратов, или *клеток*, — вроде шахматной

доски. Каждая клетка может принимать несколько различных «значений», причем существует определенное число соседних клеток, способных влиять на нее. Паттерн, или *состояние*, всей решетки изменяется дискретно, в соответствии с набором *правил перехода*, которые вводятся для всех клеток одновременно. Обычно клеточные автоматы полностью детерминированы, но, как мы увидим ниже, в правила легко могут быть включены элементы случайности.

Эти математические модели называются *автоматами*, потому что изначально они были изобретены Джоном фон Нейманном для конструирования машин с возможностью самовоспроизведения. Хотя такие машины так и не были построены, фон Нейманн абстрактно и элегантно показал, что это, в принципе, возможно⁵. С тех пор молекулярные автоматы широко используются как для имитации природных систем, так и для изобретения большого количества математических игр⁶. Наверное, самым широко известным примером является игра «Жизнь», в которой каждая клетка может иметь одно из двух «значений», например «черное» или «белое», а последовательность состояний определяется тремя простыми правилами — «рождением», «смертью» и «выживанием». В ходе игры возникает поразительное разнообразие паттернов. Некоторые из них «передвигаются»; другие сохраняют стабильность; третьи колеблются или ведут себя еще более сложным образом⁸.

Клеточные автоматы использовались профессиональными математиками и любителями не только для изобретения многочисленных игр; не менее пристально их изучали как математический инструмент для научных моделей. В силу их сетевой структуры и способности работать с большими количествами дискретных переменных, эти математические формы были вскоре признаны и приняты в качестве замечательной альтернативы дифференциальным уравнениям в области имитации сложных систем⁹. В некотором смысле эти два подхода — дифференциальные уравнения и клеточные автоматы — можно рассматривать как различные математические структуры, соответствующие двум отдельным концептуальным измерениям в теории живых систем — структуре и паттерну.

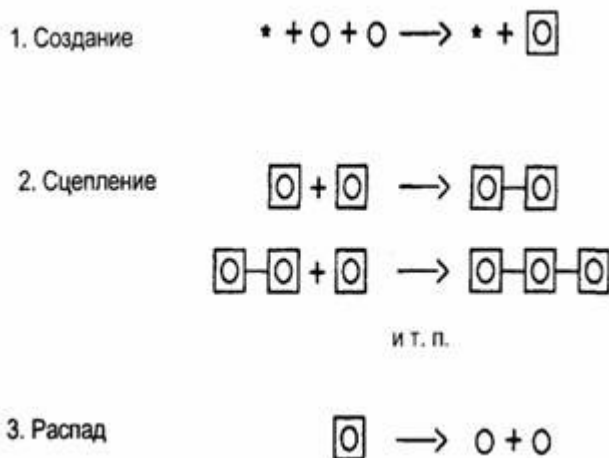
Имитация автопоэзных сетей

В начале 70-х Франциско Варела понял, что пошаговые последовательности клеточных автоматов идеальны для компьютерного моделирования и обеспечивают его мощным инструментом имитации автопоэзных сетей. И в 1974 году, совместно с Матураной и ученым-компьютерщиком Рикардо Урибе, Вареле удалось разработать требуемый компьютерный имитатор¹⁰. Их клеточный автомат состоит из решетки, в плоскости которой беспорядочно передвигаются «катализатор» и два типа

элементов. Они взаимодействуют друг с другом таким образом, что в результате могут образоваться новые элементы обоих видов; одни могут исчезать, а другие связываются друг с другом, образуя цепи.

В компьютерных распечатках решетки «катализатор» помечается звездочкой (*). Элемент первого типа, присутствующий в больших количествах, называется «субстратом» и помечается кружком (o); элемент второго типа называется «звеном» и помечается кружком внутри квадрата ([o]). Существует три различных типа взаимодействий и преобразований: два *субстрата* могут объединиться в присутствии *катализатора*, образуя *звено*; несколько звеньев могут «сцепиться», образуя цепь; любое звено, как свободное, так и входящее в цепь, может распасться снова на два субстрата. В результате некоторого количества преобразований цепь может замкнуться сама на себя.

Эти три типа взаимодействия символически изображаются так:



Точные математические предписания (так называемые «алгоритмы»), касающиеся того, когда и как происходят эти процессы, достаточно сложны. Они состоят из многочисленных правил передвижения различных элементов и их взаимодействий". Правила передвижения, например, включают следующие пункты:

- *Субстратам* разрешено перемещаться только в незанятые участки («дырки») решетки; в то же время *катализаторам* и *звеньям* разрешено вытеснять субстраты, перемещая их в соседние дырки. Катализатор, кроме того, может вытеснять свободные звенья.

- Катализатор и звенья могут также меняться местами с субстратами и, таким образом, свободно проходить сквозь их массивы.

- Субстраты — но не катализатор и не свободные звенья — могут пройти сквозь цепь и занять дырку, расположенную за ней (это имитирует полупроницаемые мембраны клеток).

- Звенья, связанные в цепь, не могут передвигаться никак.

В рамках этих правил фактическое движение элементов и многочисленные подробности их взаимодействия — создание, сцепление и распад — выбираются случайным образом¹². Когда запущена имитация на компьютере, генерируется сеть взаимодействий, включающая множество ситуаций случайного выбора, а следовательно, порождающая в свою очередь самые различные последовательности. Авторам удалось показать, что некоторые из этих последовательностей приводят к устойчивым автопоэзным паттернам.

Пример такой последовательности взят из их статьи и воспроизведен, в виде семи стадий, на рис. 9-1. В начальном состоянии (стадия 1) одна позиция решетки занята катализатором, а все другие — субстратами. На стадии 2 уже создано несколько звеньев, и, соответственно, теперь в решетке есть несколько дырок. На стадии 3 создано еще больше звеньев и некоторые из них образовали цепи. На стадиях 4-6 производство звеньев и формирование цепей продолжается, и на стадии 7 мы видим, что цепь связанных звеньев замкнулась на себя, охватив катализатор, три звена и два субстрата. Таким образом, цепь сформировала *оболочку*, проницаемую для субстрата, но не для катализатора. Как только случается такая ситуация, замкнутая цепь может стабилизироваться и превратиться в *границу* автопоэзной сети. Так случилось и в этой конкретной последовательности. Последующие стадии имитации на компьютере показали, что время от времени некоторые звенья границы могут случайно распадаться, но рано или поздно они заменяются новыми звеньями, созданными внутри оболочки в присутствии катализатора.

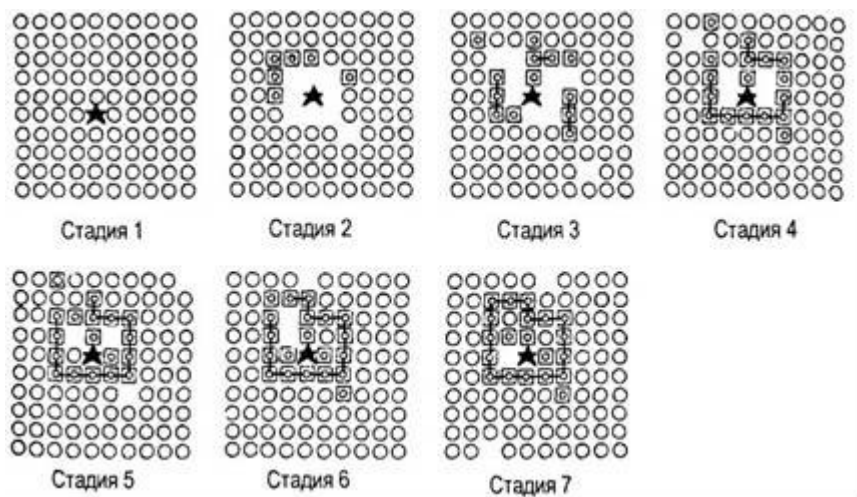


Рис. 9-1. Компьютерная имитация автопоэзной сети

В ходе длительной имитации цепь и дальше служила оболочкой для катализатора, тогда как звенья продолжали распадаться и заменяться другими. Таким образом, мембраноподобная цепь превратилась в границу *сети* преобразований, принимая при этом участие в деятельности этой же сети. Другими словами, была смоделирована автопоэзная сеть.

Будет ли последовательность такой имитации генерировать автопоэзный паттерн или не будет, в значительной мере зависит от вероятности распада, т. е. от того, насколько часто распадаются звенья. Поскольку тонкое равновесие между распадом и «починкой» основано на случайном движении субстратов сквозь мембрану, случайном создании новых звеньев и случайном перемещении этих звеньев к месту починки, мембрана будет оставаться стабильной только в том случае, если все эти процессы с большой вероятностью завершаются раньше, чем происходит следующий распад. Авторы показали, что при очень маленькой вероятности распада жизнеспособные автопоэзные паттерны действительно могут быть получены¹³.

Двоичные сети

Клеточный автомат, разработанный Варелой и его коллегами, стал одним из первых примеров того, как можно моделировать самоорганизующиеся сети живых систем. За последние двадцать лет было изучено множество других имитаций; показано, что эти математические модели способны спонтанно генерировать сложные высокоупорядоченные паттерны, в которых проявляются некоторые важные принципы порядка, наблюдаемые в живых системах.

Эти исследования получили новый толчок, когда стало ясно, что

недавно разработанные элементы теории динамических систем — аттракторы, фазовые портреты, схемы бифуркации и т. п. — могут быть использованы в качестве эффективных инструментов для анализа моделей математических сетей. Взяв на вооружение эти новые методы, ученые снова обратились к двоичным сетям, разработанным в 40-е годы, и обнаружили, что, хотя это не автопознанные сети, их анализ приводит к удивительным открытиям в области сетевых паттернов живых систем. Значительную часть этой работы выполнил биолог-эволюционист Стюарт Кауффман совместно с коллегами в институте Санта-Фе, Нью-Мехико¹⁴.

Поскольку изучение сложных систем с помощью аттракторов и фазовых портретов во многом связано с развитием теории хаоса, перед Кауффманом и его коллегами встал естественный вопрос: какова роль хаоса в живых системах? Мы и теперь еще далеки от полного ответа на этот вопрос, однако работа Кауффмана привела к нескольким интереснейшим идеям. Чтобы понять их, нам придется более пристально рассмотреть двоичные сети.

Двоичная сеть состоит из узлов, или переключателей, каждый из которых может находиться в одном из двух состояний, обычно обозначаемых ВКЛ и ВЫКЛ. То есть эта сеть более ограничена в возможностях, чем клеточный автомат, клетки которого могут находиться больше чем в двух состояниях. С другой стороны, узлы двоичной сети не обязательно образуют регулярную решетку, но могут быть соединены между собой более сложными способами.

Двоичные сети называют также «булевыми сетями», по имени английского математика Джорджа Буля, который использовал двоичные («да-нет») операции в середине XIX века для разработки символической логики, известной теперь как булева алгебра. На рис. 9-2 показана простая двоичная, или булева, сеть с шестью переключателями, каждый из которых подключен к трем соседним, причем два переключателя находятся в состоянии ВКЛ (черный цвет), а четыре — ВЫКЛ (белый цвет).

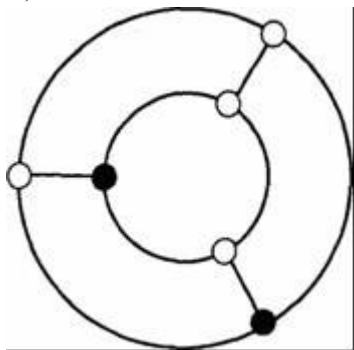


Рис. 9-2. Простая двоичная сеть

Как и в случае клеточного автомата, паттерн переключателей ВКЛ-ВЫКЛ в двоичной сети меняется дискретным образом. Переключатели соединены между собой так, что состояние каждого переключателя определяется предыдущими состояниями соседних переключателей в соответствии с некоторыми «правилами переключения». Например, для сети, изображенной на рис. 9-2, мы можем выбрать следующее правило: переключатель перейдет в состояние ВКЛ на следующем шаге, если по меньшей мере двое из его соседей на этом шаге будут находиться в состоянии ВКЛ; во всех других случаях А остается в состоянии ВЫКЛ.

На рис. 9-3 показаны три последовательности, образовавшиеся по этому правилу. Мы видим, что последовательность А достигает стабильного паттерна, в котором все переключатели находятся в состоянии ВКЛ, через два шага; последовательность В после первого шага колеблется между двумя дополняющими друг друга паттернами; паттерн же С стабилен с самого начала, воспроизводя себя в каждом шаге. Чтобы проанализировать подобные последовательности математически, каждый паттерн, или состояние, сети определяют шесть двоичными (ВКЛ-ВЫКЛ) переменными, т. е. всего двенадцатью переменными. В результате каждого шага система переходит из определенного состояния в определенное последующее состояние, в полном соответствии с правилом переключения.

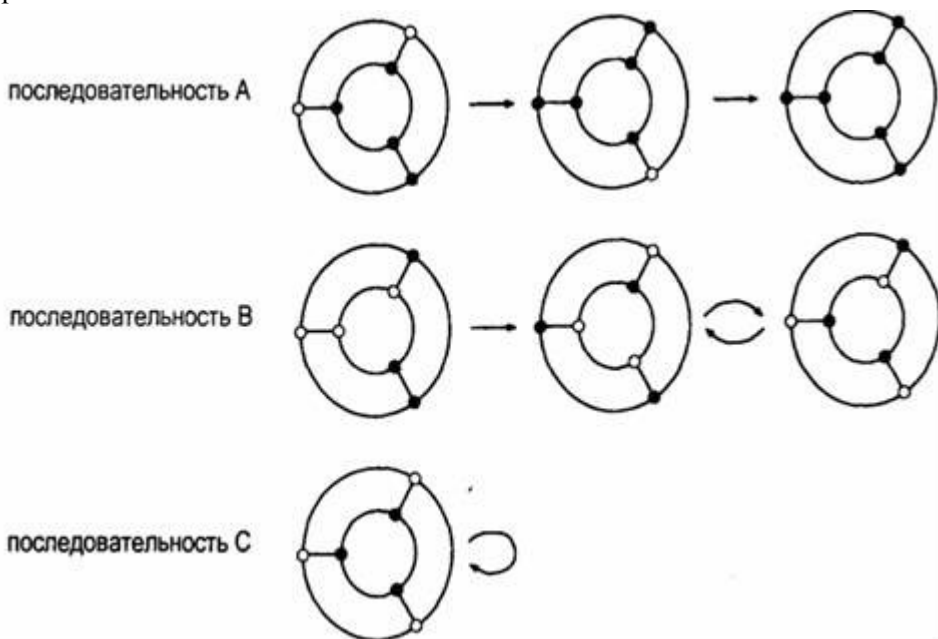


Рис. 9-3. Три последовательности состояний в двоичной сети

Как и в системах, описываемых дифференциальными уравнениями, каждое состояние изображается точкой в 12-мерном фазовом пространстве¹⁵. По мере того как, шаг за шагом, сеть переходит из одного состояния в другое, последовательность состояний вычерчивает траекторию в этом фазовом пространстве. Для классификации траекторий различных последовательностей применяется концепция аттракторов. Так, в нашем примере, последовательность А, которая движется к стабильному состоянию, связана с точечным аттрактором, тогда как колеблющееся состояние В соответствует периодическому аттрактору.

Кауффман и его коллеги использовали эти двоичные сети для моделирования чрезвычайно сложных систем — химических и биологических сетей с тысячами связанных между собой переменных; такие системы совершенно невозможно описать дифференциальными уравнениями¹⁶. Как и в нашем простом примере, последовательность состояний этих сложных систем изображается траекторией в фазовом пространстве. Поскольку число возможных состояний в любой двоичной сети конечно (хотя оно может быть чрезвычайно большим), система должна рано или поздно прийти в то состояние, которое уже встречалось. Когда это произойдет, то следующим шагом система перейдет в то же самое состояние, в которое она переходила и прежде, — поскольку ее поведение полностью детерминировано. Она последовательно повторит тот же цикл состояний. Подобные циклы состояний представляют собой периодические (или циклические) аттракторы двоичной сети. Любая двоичная сеть имеет по крайней мере один аттрактор, но может иметь и больше. Предоставленная самой себе, система в конечном счете закрепится при одном из своих аттракторов и будет в нем оставаться.

Периодические аттракторы, вокруг каждого из которых существует своя область притяжения, — наиболее важные математические характеристики двоичных сетей. Обширные исследования показали, что многие живые системы — включая генетические сети, иммунные системы, нейронные сети, системы органов и экосистемы — могут быть представлены в виде двоичной сети, обладающей несколькими альтернативными аттракторами¹⁷.

Различные циклы состояний в двоичной сети могут значительно различаться по длине. В некоторых сетях они бывают исключительно длинными, и длина эта возрастает по экспоненте с ростом числа переключателей. Кауффман определил аттракторы этих исключительно длинных циклов, насчитывающих миллиарды и миллиарды различных состояний, как «хаотические», поскольку их длина практически бесконечна.

Тщательный анализ аттракторов больших двоичных сетей подтвердил

то, что кибернетики обнаружили еще в 40-е годы. Некоторые сети хаотичны, поскольку генерируют кажущиеся случайными последовательности и бесконечно длинные аттракторы; другие же генерируют совсем простые аттракторы, соответствующие паттернам высокого порядка.

Таким образом, изучение двоичных сетей дает еще одно представление о феномене самоорганизации. Сети, координирующие совместную деятельность тысяч элементов, могут проявлять высокоупорядоченную динамику.

У границы хаоса

Чтобы установить точную взаимосвязь между порядком и хаосом в этих моделях, Кауффман проверил множество сложных двоичных сетей и разнообразных правил переключения, включая сети, в которых число «входов», или звеньев, различно для разных переключателей. Он обнаружил, что поведение этих сложных паутин можно подытожить, учитывая два параметра: N — число переключателей в сети; K — среднее число входов на каждом переключателе. Для значений K больше 2, то есть в случае множественных взаимосвязей в сети, поведение последней хаотично, но по мере того, как K уменьшается и приближается к 2, устанавливается порядок. Порядок может возникнуть и при более высоких значениях K , если правила переключения «смещены» — например, если ВКЛ преобладает над ВЫКЛ.

Подробные исследования перехода от хаоса к порядку показали, что по мере того, как K приближается к 2, двоичные цепи развивают «замороженное ядро» элементов. Это те звенья, которые остаются в одной и той же позиции, ВКЛ или ВЫКЛ, пока система проходит весь цикл состояний. При еще большем приближении K к 2, замороженное ядро создает «стены постоянства», которые вырастают по всей системе, разделяя сеть на отдельные островки меняющихся элементов. Эти островки функционально изолированы. Изменения в поведении одного острова не могут быть переданы сквозь замороженное ядро на другие острова. Если значение K продолжает падать, острова тоже замерзают; периодический аттрактор превращается в точечный, и вся сеть достигает устойчивого, замороженного паттерна.

Таким образом, сложным двоичным цепям свойственны три общих режима поведения: упорядоченный режим с замороженными компонентами, хаотический режим без замороженных компонентов и пограничный режим между порядком и хаосом, где замороженные компоненты лишь начинают «таять». Центральная гипотеза Кауффмана заключается в том, что живые системы существуют в этой пограничной области, у *края хаоса*. Он поясняет, что глубоко в упорядоченном режиме

островки деятельности были бы слишком маленькими и изолированными, чтобы сложное поведение могло распространяться по всей системе. Глубоко в хаотическом режиме, с другой стороны, система была бы слишком чувствительна к мельчайшим возмущениям, чтобы поддерживать свою организацию. Таким образом, роль естественного отбора может заключаться в том, чтобы поддерживать живые системы, организованные «на краю хаоса», — потому что здесь они лучше координируют сложное и гибкое поведение, лучше приспособляются и развиваются.

Чтобы проверить эту гипотезу, Кауффман применил свою модель к генетическим сетям в живых организмах, и ему удалось вывести из нее несколько удивительных и довольно точных предсказаний¹⁸. Великие достижения молекулярной биологии, часто именуемые «разгадкой генетического кода», побуждают нас воспринимать цепочки генов в ДНК как некий биохимический компьютер, выполняющий «генетическую программу». Тем не менее последние исследования с нарастающей убедительностью показывают, что этот путь мышления совершенно ошибочен. Фактически он так же неадекватен, как метафора мозга в виде компьютера, обрабатывающего информацию¹⁹. Полный набор генов в организме, так называемый «геном», формирует обширную взаимосвязанную сеть, с множеством петель обратной связи, в которой гены прямо и косвенно регулируют деятельность друг друга. По словам Франциско Варелы, «Геном — это не линейный массив независимых генов (проявляющихся как личные качества организма), но в высшей степени взаимно переплетенная сеть множества взаимных воздействий, передаваемых посредством *репрессоров* и *дерепрессоров*, *экзонов* и *интронов*, скачущих генов и даже структурных протеинов»²⁰.

Когда Стюарт Кауффман начал изучать эту сложную генетическую паутину, он заметил, что на каждый ген в сети напрямую воздействует лишь небольшое число других генов. Более того, уже в 60-е годы было известно, что деятельность генов, как и нейронов, может быть смоделирована на языке двоичных значений ВКЛ-ВЫКЛ. Поэтому, размышлял Кауффман, двоичные сети должны быть подходящими моделями для геномов. Так и оказалось.

Действительно, геном моделируется двоичной сетью «на краю хаоса», т. е. сетью с замороженным ядром и изолированными островами «живых», изменяющих свою позицию переключателей. Эта сеть обладает относительно небольшим количеством циклов состояний, представленных в фазовом пространстве отдельными периодическими аттракторами, каждый из которых имеет свою область притяжения. Такая система может подвергаться двум типам возмущений. «Минимальное» возмущение состоит в случайном кратковременном переходе двоичного элемента в противоположное состояние. Оказывается, что каждый цикл состояний

модели замечательным образом устойчив к таким минимальным возмущениям. Изменения, вызванные возмущением, не выходят за пределы данного островка деятельности. Другими словами, модель проявляет способность к *гомеостазу* — свойство, присущее всем живым системам.

Другой тип возмущения представляет собой долговременное структурное изменение в сети — например, изменение в паттерне связей или в правилах переключения, — что соответствует мутации в генетической системе. Большинство таких структурных возмущений лишь слегка изменяют поведение сети «на краю хаоса». Некоторые из них, однако, могут сместить траекторию сети в другую сферу притяжения, что приведет к новому циклу состояний и в результате к новому повторяющемуся паттерну поведения. Кауффман видит в этом правдоподобную модель эволюционного приспособления:

Сети на границе между порядком и хаосом могут обладать гибкостью быстрой и удачной адаптации через накопление полезных вариантов. В такого рода уравновешенных системах большинство мутаций заканчиваются незначительными последствиями благодаря гомеостатической природе системы. Некоторые мутации, тем не менее, могут вызвать обширные каскады перемен. Поэтому уравновешенные системы, как правило, приспособляются к окружающей среде постепенно, однако в некоторых случаях, когда это необходимо, они изменяются быстро²¹.

Еще один ряд впечатляющих особенностей модели Кауффмана касается феномена дифференциации клеток в ходе развития живых организмов. Хорошо известно, что все типы клеток в организме, несмотря на их весьма различные формы и функции, содержат примерно одни и те же генетические инструкции. Считаясь с этим неопровержимым фактом, биологи, занимающиеся проблемами развития, пришли к выводу, что типы клеток различаются не потому, что содержат различные гены, но потому, что в них различны *активные* гены. Другими словами, структура генетической сети одинакова во всех клетках, однако паттерны генетической деятельности различаются; а поскольку различные паттерны генетической деятельности отвечают различным циклам состояний двоичной сети, Кауффман предположил, что разные типы клеток могут соответствовать разным циклам состояний и, соответственно, разным аттракторам.

Эта «аттракторная» модель дифференциации клеток приводит к нескольким интересным предсказаниям²². Каждая клетка человеческого тела содержит около 100 000 генов. В двоичной сети такого размера возможности различных паттернов выражения генов описываются

астрономическими цифрами. Тем не менее число аттракторов в такой сети на пороге хаоса примерно равно квадратному корню из числа ее элементов. j Поэтому сеть из 100 000 генов должна выражать себя примерно в $317 \sqrt{}$ типах клеток. Это число, выведенное из самых общих положений модели Кауффмана, замечательно приближается к 254 различным типам клеток, обнаруженных в человеческом организме.

Кауффман проверил свою аттракторную модель также по числу типов клеток у различных других биологических видов; оказалось, что и эти числа связаны с количеством генов. На рис. 9-4 показаны результаты для нескольких видов²³. Очевидно, что количество типов клеток и количество аттракторов соответствующих двоичных цепей возрастает, более или менее параллельно, с увеличением числа генов.

Еще два предсказания аттракторной модели Кауффмана касаются стабильности типов клеток. Поскольку замороженное ядро двоичных сетей идентично для всех аттракторов, все клетки организма должны выражать почти один и тот же набор генов и должны различаться по выраженности в небольшом проценте генов. Оказывается, что это действительно так — у всех живых организмов.

Аттракторная модель предполагает также, что в процессе развития создаются новые типы клеток — через смещение системы из одной области притяжения в другую. Поскольку у каждой области притяжения есть лишь несколько соседних областей, видоизменение клетки любого типа должно совершаться как переход к немногим непосредственно соседним типам, от них — к следующим соседям и так далее, пока не будет создан полный набор типов клеток. Другими словами, видоизменение Клеток должно происходить в виде последовательно ветвящихся траекторий. Всем биологам известно, что в течение почти 600 миллионов лет дифференциация клеток в многоклеточных организмах происходила именно по этому паттерну.

Жизнь в ее минимальной форме

Помимо компьютерных имитаций разнообразных самоорганизующихся сетей — как автопоэзных, так и не-автопоэзных, — биологам и химикам позже удалось синтезировать химические автопоэзные системы в лаборатории. Эта возможность была предсказана теоретически Франциско Варелой и Пьером Луиджи Луиси в 1989 году и в дальнейшем реализована в двух типах экспериментов Луиси и его коллегами из Швейцарского политехнического университета (ШПУ) в Цюрихе²⁴. Эти новые концептуальные и экспериментальные достижения резко обострили дискуссию о том, что представляет собой жизнь в ее минимальной форме.

Автопоэз, как мы видели, определяется как сетевой паттерн, в котором функция каждого компонента заключается в том, чтобы участвовать в

создании или преобразовании других компонентов. Биолог и философ Гэйл Фляйшакер обобщил свойства автопоэзной сети по трем критериям: система должна быть самоограниченной, самопорождающей и самосохраняющейся²⁵.

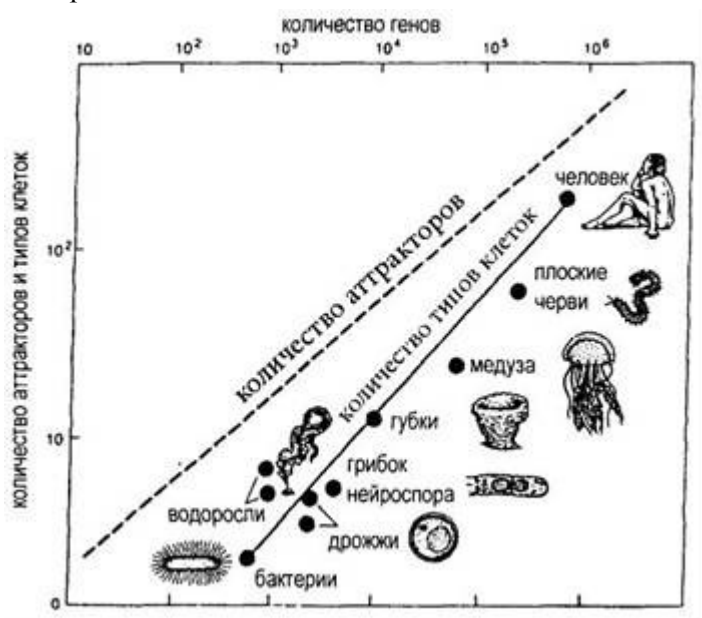


Рис. 9-4.

Взаимосвязь между количеством генов, типами клеток и аттракторами в соответствующих двоичных сетях для различных биологических видов

Самосозидание

Самоограничение означает, что протяженность системы определяется границей, которая одновременно является неотъемлемой частью сети. *Самопорождение* означает, что все компоненты, включая элементы границы, создаются как продукты процессов, происходящих внутри сети. *Самосохранение* означает, что процессы производства длятся непрерывно таким образом, что все компоненты постоянно заменяются в ходе системных процессов преобразования.

Хотя клетка бактерии — простейшая из автопоэзных систем, встречаемых в природе, недавние эксперименты в ШПУ показали, что химические структуры, удовлетворяющие критериям автопоэзной организации, могут быть созданы и в лаборатории. Первая из этих структур, предложенная Луиси и Варелой в их теоретической статье, известна химикам как *мицелла*. По существу, это капелька воды, окруженная тонким слоем молекул, по форме напоминающих головастиков, с «головками», притягивающими воду, и «хвостами»,

отталкивающими воду (см. рис. 9-5).

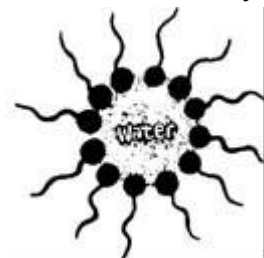


Рис. 9-5. Схематическое изображение капли-мицеллы

При определенных обстоятельствах такая капля становится местом химических реакций, продуктами которых являются специальные вещества: они самоорганизуются в настоящие пограничные молекулы, которые выстраивают структуру и обеспечивают условия для протекания реакций. Таким образом создается простая химическая автопоэзная система. Как и в компьютерной имитации Варелы, реакции происходят внутри границы, построенной из самих продуктов реакций.

После первого примера автопоэзной химии исследователям из ШПУ удалось создать другой тип химической структуры, которая еще больше соответствует клеточным процессам, поскольку ее основные ингредиенты — так называемые *жирные кислоты* — являются материалом стенок в реальных клетках. Эксперименты состояли в формировании сферических водяных капелек, окруженных оболочками из этих жирных веществ; оболочки имели типичную полупроницаемую структуру биологических мембран (но без их протеиновых компонентов) и генерировали каталитические циклы, приводя к становлению автопоэзной системы. Ученые, проводившие эти эксперименты, предположили, что подобные типы систем могли быть первыми замкнутыми самовоспроизводящимися химическими структурами, возникшими до эволюции бактериальной клетки. Если это верно, то, значит, ученым удалось воспроизвести первые минимальные формы жизни.

Организмы и сообщества

Исследования по теории автопоэза до сих пор касались, главным образом, минимальных автопоэзных систем — простых клеток, компьютерных имитаций и недавно открытых автопоэзных химических структур. Гораздо меньше исследований было проведено по изучению автопоэза многоклеточных организмов, экологических и социальных систем. Поэтому сегодняшние представления о сетевых паттернах в этих живых системах все еще носят преимущественно умозрительный характер²⁶.

Все живые системы — это сети более мелких компонентов, а паутина жизни в целом — многослойная структура живых систем, вложенных в другие живые системы — сети внутри сетей. Организмы — это совокупности автономных, но тесно связанных клеток; популяции — это сети автономных организмов, принадлежащих отдельным видам; а экосистемы — это паутины организмов, как одноклеточных, так и многоклеточных, принадлежащих многим различным видам.

Все эти живые системы роднит то, что их мельчайшими живыми компонентами всегда служат клетки, и поэтому мы можем с уверенностью сказать, что все живые системы в конечном счете автопоэзны. Тем не менее возникает интересный вопрос: являются ли более крупные системы, состоящие из автопоэзных клеток, — организмы, сообщества и экосистемы — автопоэзными по своей сути?

В книге «Древо познания» Матурана и Варела утверждают, что наше сегодняшнее знание о деталях метаболических направлений в организмах недостаточно для того, чтобы дать ясный ответ, и поэтому они оставляют вопрос открытым:

Единственное, что мы можем сказать: [многоклеточные системы] *операционно закрыты* в своей организации; их идентичность определяется сетью динамических процессов, воздействие которых не выходит за пределы этой сети. Но, наблюдая эту организацию в ее видимой форме, мы ничего не сможем добавить к сказанному²⁷.

В дальнейшем авторы подчеркивают, что три типа многоклеточных живых систем — организмов, экосистем и сообществ — радикально различаются по степени автономии своих компонентов. В организмах клеточные компоненты обладают минимальной степенью автономного существования, тогда как компоненты человеческих сообществ, индивидуальные человеческие существа, наделены максимальной степенью автономии, наслаждаясь множеством измерений независимого существования. Сообщества животных и экосистемы занимают промежуточные положения между этими двумя экстремумами.

Человеческие сообщества представляют специальный случай из-за решающей роли языка, который Матурана определил как критический феномен в развитии человеческого сознания и культуры²⁸. Если сплоченность социальных насекомых основана на обмене химическими веществами между особями, то социальное единство в человеческих сообществах основано на обмене языковыми сообщениями.

Компоненты организма существуют ради функционирования организма, однако человеческие социальные системы существуют также и *ради своих компонентов* — индивидуальных человеческих существ. Так, по словам Матураны и Варелы:

Организм ограничивает индивидуальное творчество своих составляющих, поскольку эти составляющие существуют ради этого организма. Человеческая социальная система усиливает индивидуальное творчество своих компонентов, поскольку она существует ради этих компонентов²⁹.

Поэтому организмы и человеческие сообщества — очень разные типы живых систем. Тоталитарные политические режимы часто жестоко ограничивали автономию членов сообщества и, поступая так, деперсонализировали и дегуманизировали их. Фашистские сообщества по режиму своего функционирования ближе к организмам, и поэтому нельзя считать совпадением, что диктаторы так любили использовать метафору общества как живого организма.

Автопозз в социальной сфере

Вопрос о том, может ли человеческая социальная система быть описана как автопоззная, обсуждался довольно широко, и разные авторы предлагали разные ответы³⁰. Главная проблема состоит в том, что автопозз был точно определен лишь для систем в физическом пространстве и для компьютерных имитаций в математических пространствах. Благодаря «внутреннему миру» понятий, идей и символов, обусловленных человеческой мыслью, сознанием и языком, человеческие социальные системы существуют не только в физическом мире, но также и в символическом социальном мире.

Так, человеческая семья может быть описана как биологическая система, обусловленная определенными кровными связями, но также и как *концептуальная система*, обусловленная определенными ролями и взаимоотношениями, которые могут совпадать — или не совпадать — с кровными связями между ее членами. Эти роли зависят от социальных соглашений и могут значительно меняться в различные периоды времени и в различных культурах. Например, в современной западной культуре роль «отца» может исполнять биологический отец, приемный отец, отчим, дядя или старший брат. Другими словами, эти роли не являются объективными особенностями семейной системы, но служат гибкими и постоянно пересматриваемыми социальными конструктами³¹.

Если поведение в физическом мире управляется причиной и следствием, так называемыми *законами природы*, то поведение в социальном мире управляется правилами, выработанными социальной системой и часто закодированными в законе. Критическое различие состоит в том, что социальные правила можно нарушить, а законы природы — невозможно. Человеческие существа могут выбирать, подчиняться ли, и в какой форме, социальному правилу; молекулы не могут выбирать, взаимодействовать им или нет³².

Учитывая одновременное пребывание социальных систем в двух мирах, физическом и социальном, имеет ли вообще смысл применять к ним понятие автопоэза, а если имеет, то относительно какого мира его следует применять?

Оставив вопрос открытым в упомянутой книге, Матурана и Варела впоследствии отдельно выражали свои несколько различные взгляды по этому вопросу. Матурана рассматривает социальные системы не как автопоэзные образования, но как некую среду, в которой человеческие существа реализуют свой биологический автопоэз через «языкотворчество»³³. Варела утверждает, что концепция сети процессов производства, которая лежит в основе определения автопоэза, не может быть применена вне физической сферы, однако для социальных систем может быть определена более широкая концепция *организационной закрытости*. Эта более широкая концепция сродни автопоэзу, но она не выделяет специально процессов производства³⁴. Автопоэз, по мнению Варелы, можно рассматривать как частный случай организационной закрытости на клеточном уровне и в определенных химических системах.

Другие авторы утверждают, что автопоэзная социальная сеть может быть определена, если описание человеческих социальных систем не выходит за рамки социальной сферы. Эта школа мысли была основана в Германии социологом Никласом Люманном, который весьма подробно разработал концепцию социального автопоэза. Суть подхода Люманна состоит в том, чтобы идентифицировать социальные процессы автопоэзной сети как процессы коммуникации:

Социальные системы используют коммуникацию как свой особый способ автопоэзного воспроизведения. Их элементами являются сообщения, которые... производятся и воспроизводятся через сеть связи и которые не могут существовать вне такой сети³⁵.

Семейная система, к примеру, может быть определена как сеть переговоров, которым присуща кругообразность. Результаты переговоров побуждают к дальнейшим переговорам, и, таким образом, формируются самоусиливающие петли обратной связи. Закрытость сети приводит к общей системе убеждений, объяснений и ценностей — контексту смысла, — которая непрерывно поддерживается дальнейшими переговорами.

Коммуникативные акты сети переговоров включают «самопроизводство» и ролей, которыми определяются различные члены семьи, и границ семейной системы. Поскольку все эти процессы происходят в символическом социальном мире, такие границы не могут иметь физическую природу. Это границы ожиданий, конфиденциальности, верности и т. п. Как семейные роли, так и границы непрерывно поддерживаются и переоцениваются посредством автопоэзной сети

переговоров.

Система Гайи

На протяжении последних лет дискуссии по автопоэзу в социальных системах велись очень оживленно; в то же время, как это ни удивительно, по проблеме автопоэза в экосистемах не опубликовано почти ничего. Приходится согласиться с Матураной и Варелой, что множество тенденций и процессов в экосистемах еще не изучены в такой степени, чтобы решать, могут ли экологические сети быть описаны как автопоэзные. Тем не менее было бы безусловно интересно начать дискуссии по автопоэзу с экологами, подобные дискуссиям с социальными исследователями.

Прежде всего можно сказать, что функция каждого компонента пищевой паутины состоит в том, чтобы преобразовывать другие компоненты в пределах той же паутины. В то время как деревья извлекают неорганическую материю из окружающей среды, чтобы производить органические соединения, и эти соединения передаются по экосистеме, служа пищей для производства более сложных структур, сеть в целом регулирует себя через множественные петли обратной связи³⁶. Отдельные компоненты пищевой паутины непрерывно умирают, разлагаются и заменяются в ходе собственных процессов преобразования в сети. Достаточно ли этого, чтобы определить экосистему как автопоэзную, покажет время. Кроме прочего, это еще зависит и от ясного понимания границы системы.

Перенося наши представления с экосистем на планету в целом, мы сталкиваемся с глобальной сетью процессов производства и преобразования, которая достаточно подробно была описана Джеймсом Лавлоком и Линн Маргулис в их Гайя-теории³⁷. Фактически сегодня можно представить больше свидетельств, подтверждающих автопоэзную природу системы Гайи, чем доказательств существования автопоэза в экосистемах.

Планетарная система функционирует в огромных пространственных и временных масштабах. Поэтому конкретно осмысливать Гайю как живое существо весьма затруднительно. Жива ли планета как целое или это относится лишь к ее отдельным частям, и если верно последнее, то к каким частям? Чтобы помочь нам увидеть в Гайе живую систему, Лавлок предложил аналогию дерева³⁷. У растущего дерева лишь очень тонкий слой клеток, расположенных по его периметру, как раз под корой, является живым. Вся древесная масса внутри, более 97 процентов всего дерева, мертва. Подобным же образом, Земля покрыта тонким слоем живых организмов — биосферой, — которая углубляется в океан на 5—6 миль и поднимается над земной поверхностью примерно на такую же высоту.

Итак, живая часть Земли — не что иное, как тонкая пленка вокруг земного шара. Если представить планету в виде мяча, размером с баскетбольный, с нарисованными на нем океанами и странами, то толщина биосферы будет примерно равна толщине краски!

Точно так же как корой дерева защищен внутренний тонкий слой живой ткани от повреждений, жизнь на Земле защищена слоем атмосферы, который закрывает нас от ультрафиолетового излучения и других вредных воздействий и поддерживает температуру планеты на уровне, благоприятном для процветания жизни. Ни атмосфера над нами, ни комья земли под нами не являются живыми, но и те, и другие в значительной мере сформированы и преобразованы живыми организмами — точно так же как кора и древесная масса дерева. Открытый космос и недра Земли составляют часть окружающей среды Гайи.

Чтобы понять, может ли система Гайи действительно быть описана как автопоэзная сеть, применим три критерия, предложенные Гэйлом Фляйшакером³⁹. Гайя — система определено *самоограниченная*, по крайней мере это касается внешней границы, атмосферы. Согласно Гайя-теории, атмосфера Земли создается, преобразуется и поддерживается метаболическими процессами биосферы. Бактерии играют важнейшую роль в этих процессах, влияя на скорость химических реакций, и, таким образом, функционируют как биологический эквивалент ферментов в клетке⁴⁰. Атмосфера полупроницаема, как клеточная мембрана, и формирует общую часть планетарной сети. Например, она создала защитную теплицу, в которой стало возможным зарождение жизни на планете три миллиарда лет тому назад, хотя в те времена излучение Солнца было на 25% слабее, чем сейчас⁴¹.

Система Гайи является также, несомненно, *самопорождающейся*. Планетарный метаболизм превращает неорганические вещества в органические — в живую материю, — а затем возвращает их в почву, океаны и воздух. Все компоненты сети Гайи, включая элементы атмосферной границы, производятся процессами внутри самой сети.

Ключевой характеристикой Гайи является сложное переплетение Живых и неживых систем в пределах единой паутины. Это приводит к возникновению циклов обратной связи совершенно разных масштабов. Циклы горных пород, например, растягиваются на сотни миллионов лет, тогда как организмы, связанные с ними, живут очень недолго. Как метафорически выразился Стивен Хардинг, эколог и соратник Джеймса Лавлока: «Живые существа выходят из камней и уходят в камни»⁴².

И наконец, система Гайи очевидно *самосохраняющаяся*. Компоненты океанов, почвы и воздуха, равно как и все организмы биосферы, непрерывно заменяются в ходе планетарных процессов производства и

преобразования. Похоже, таким образом, что основания для признания Гайи автопоэзной сетью очень вески. И Линн Маргулис, соавтор Гайя-теории, уверенно заявляет: «Мало сомнений в том, что планетарная паутина, включая и нас самих, автопоэзна»⁴³.

Убежденность Линн Маргулис в автопоэзности планетарной паутины подкреплена тремя десятилетиями новаторской работы в области микробиологии. Для понимания сложности, разнообразия и самоорганизующих свойств сети Гайи абсолютно необходимо понимание микрокосма — природы, развития, метаболизма и эволюции микроорганизмов. Маргулис внесла огромный вклад в это понимание не только в научном мире. Ей также удалось, в сотрудничестве с Дорион Саган, объяснить свои радикальные открытия ясным и занимательным языком непосвященному читателю⁴⁴.

Жизнь на Земле зародилась примерно 3,5 миллиарда лет назад, и первые два миллиарда лет живой мир состоял исключительно из микроорганизмов. В течение первого миллиарда лет эволюции бактерии — простейшие формы жизни — покрыли планету сложной паутиной метаболических процессов и начали так воздействовать на температуру и химический состав атмосферы, что она стала благоприятной для эволюции высших форм жизни⁴⁵.

Растения, животные и люди поздно появились на Земле: они возникли из микрокосма менее миллиарда лет назад. И даже сегодня известные нам живые организмы функционируют лишь благодаря хорошо развитой связи с бактериальной паутиной жизни. «Мы вовсе не оставили микроорганизмы где-то позади на эволюционной беговой дорожке, — пишет Маргулис. — Мы все окружены ими и состоим из них... [Нам следует] воспринимать самих себя и всю нашу окружающую среду как эволюционную мозаику микрокосмической жизни»⁴⁶.

За всю эволюционную историю жизни более 99% когда-либо существовавших видов вымерло, однако планетарная паутина бактерий выжила и продолжает регулировать условия для жизни на Земле, как она это делала на протяжении последних трех миллиардов лет. Согласно Маргулис, концепция планетарной автопоэзной сети оправдана, поскольку вся жизнь заключена в самоорганизующуюся паутину бактерий, включающую сложные сети сенсорных и исполнительных систем, которые мы только начинаем познавать. Мириады бактерий, живущих в почве, скалах и океанах, равно как и внутри всех растений, животных и людей, непрерывно регулируют жизнь на Земле: «Именно рост, метаболизм и способность микробов к обмену газами... формируют сложные физические и химические системы с обратной связью, которые, в свою очередь, модулируют биосферу, а вместе с ней и нас, ее обитателей»⁴⁷.

Вселенная в целом

Размышляя о планете как о живом существе, невольно задумываешься о системах более крупного масштаба. Не является ли Солнечная система автопоэзной сетью? А Галактика? А что можно сказать о Вселенной в целом? Жива ли Вселенная?

Что касается Солнечной системы, то здесь мы с определенной степенью уверенности можем сказать, что она не является живой системой. И именно поразительное различие между Землей и всеми другими планетами Солнечной системы привело Лавлока к формулировке Гайя-гипотезы. В отношении нашей Галактики, или Млечного Пути, мы даже близко не подошли к тем данным, которые могли бы позволить выдвинуть вопрос о том, живая ли это система; а переключая наше внимание на Вселенную в целом, мы тем более упираемся в ограниченность человеческих представлений.

Для многих людей, включая меня, в философском и духовном аспекте предпочтительней предположить, что космос в целом жив, нежели думать, что жизнь на Земле существует в окружении безжизненной Вселенной. В рамках науки, однако, мы не можем — или по крайней мере пока не можем — делать подобные заявления. Если мы применим наши научные критерии жизни ко всей Вселенной, мы встретимся с серьезными концептуальными трудностями.

Живые системы определяются как открытые непрерывному потоку энергии и материи. Но как мы можем представить себе Вселенную открытой системой, если она, по определению, включает в себе все сущее? В этом вопросе, похоже, не больше смысла, чем в вопрошании: что происходило до Большого Взрыва? По словам известного астронома сэра Бернарда Лоувелла:

Здесь мы приходим к великому барьеру для нашей мысли... Я ощущаю себя так, как будто внезапно въехал в огромную полосу тумана — знакомый мир исчез⁴⁸.

Мы *можем* сказать относительно Вселенной только то, что потенциал для жизни в избытке существует во всем космосе. Исследования двух последних десятилетий дают достаточно ясную картину геологических и химических особенностей ранней Земли, которые сделали появление жизни возможным. Мы начали понимать, как развивались все более и более сложные химические системы и как они формировали каталитические циклы, которые в конце концов развились в автопоэзные системы⁴⁹.

Изучая Вселенную в целом и, в частности, нашу Галактику, астрономы обнаружили, что характерные химические компоненты, встречающиеся во всех проявлениях жизни, присутствуют там в избытке. Для того чтобы из

этих компонентов смогла возникнуть жизнь, требуется тонкий баланс температур, атмосферных давлений и содержания воды. В ходе долгой эволюции Галактики такой баланс с большой вероятностью мог быть достигнут на многих планетах миллиардов планетарных систем, содержащихся в Галактике.

Даже в нашей Солнечной системе, как на Венере, так и на Марсе, в период их ранней истории, возможно, существовали океаны, в которых могла зародиться жизнь⁵⁰. Однако Венера была слишком близка к Солнцу, чтобы обеспечить неторопливую эволюцию. Ее океаны испарились, и в конце концов водород был выбит из молекул воды мощным ультрафиолетовым излучением и исчез в космосе. Мы не знаем, каким образом потерял свою воду Марс, нам лишь известно, что это действительно произошло. Лавлок высказывает по этому поводу догадку, что, возможно, на Марсе существовала жизнь на ранних стадиях его развития, но он потерял ее в результате некоей катастрофы; или же водород пропал там быстрее, чем на ранней Земле, из-за гораздо более слабой силы гравитации на Марсе.

Как бы то ни было, похоже, что жизнь на Марсе *почти* зародилась и что, по всей вероятности, она действительно зародилась и процветает на миллионах других планет по всей Вселенной. Таким образом, хотя в рамках современной науки концепция Вселенной как единой живой системы проблематична, мы уверенно можем сказать, что жизнь с большой вероятностью присутствует в космосе в избытке.

Структурное сопряжение

Где бы мы ни наблюдали жизнь, от бактерий до широкомасштабных экосистем, мы видим сети с компонентами, которые взаимодействуют друг с другом таким образом, что вся сеть регулирует и организует себя. Поскольку эти компоненты, за исключением элементов клеточных сетей, сами являются живыми системами, реалистичная картина автопоэзных сетей должна включать описание того, как живые системы взаимодействуют между собой и, в общем случае, с окружающей средой. В сущности, такое описание является неотъемлемой частью теории автопоэза, разработанной Матураной и Варелой.

Главная особенность автопоэзной системы заключается в том, что она проходит непрерывные структурные изменения, одновременно сохраняя свой паутиноподобный паттерн организации. Компоненты сети непрерывно производят и преобразуют друг друга, и осуществляют они это двумя различными способами. Один тип структурных изменений представляют изменения самообновления. Всякий живой организм постоянно обновляет себя, клетки разрушаются и восстанавливаются, ткани и органы заменяют свои клетки в непрерывных циклах. Несмотря на

эти непрекращающиеся изменения, организм постоянно поддерживает свою общую идентичность, или паттерн организации.

Многие из этих циклических изменений происходят гораздо быстрее, чем это можно представить. Например, наша поджелудочная железа заменяет большинство своих клеток каждые двадцать четыре часа, клетки внутренней оболочки желудка воспроизводятся каждые три дня; наши белые кровяные тельца обновляются за десять дней, а 98 процентов протеина в нашем мозге сменяются меньше чем за месяц. Что еще более поразительно — клетки нашей кожи заменяются со скоростью 100 000 клеток в минуту. Фактически основная часть пыли в наших домах состоит из мертвых клеток кожи.

Второй тип структурных изменений в живой системе представляют изменения, посредством которых создаются новые структуры — новые связи в автопоэзной сети. Изменения второго типа — эволюционные, а не циклические; они тоже совершаются непрерывно, либо как последствия влияния окружающей среды, либо как результат внутренней динамики системы. Согласно теории автопоэза, живая система взаимодействует со своей окружающей средой через *структурное сопряжение*, т. е. через повторяющиеся взаимодействия, каждое из которых запускает структурные изменения в системе. Например, клеточная мембрана непрерывно вводит вещества из своего окружения в метаболические процессы клетки. Нервная система организма изменяет свою внутреннюю связность с каждым сенсорным восприятием. Тем не менее эти живые системы автономны. Окружающая среда лишь запускает структурные перемены, но не определяет и не направляет их⁵¹.

Структурное сопряжение, как его определяют Матурана и Варела, устанавливает четкое различие между тем, как взаимодействуют со своей окружающей средой живые и неживые системы. Пнуть камень и пнуть собаку — это две совершенно разные истории, как любил отмечать Грегори Бэйтсон. Камень будет *реагировать* на пинок согласно линейной причинно-следственной цепочке. Его поведение может быть просчитано на основе фундаментальных законов ньютоновской механики. Собака *ответит* структурными изменениями, согласно своей собственной природе и (нелинейному) паттерну организации. Результирующее поведение, в общем случае, непредсказуемо.

Поскольку живой организм отвечает на влияния окружения структурными изменениями, то и эти изменения, в свою очередь, влияют на его последующее поведение. Другими словами, структурно сопряженная система — это обучающаяся система. Пока организм остается живым, он будет структурно сопрягаться со своим окружением. Его непрерывные структурные изменения в ответ на события — и,

следовательно, его непрерывное приспособление, обучение и развитие — это и есть ключевые характеристики поведения живых существ. Благодаря его структурному сопряжению, мы называем поведение животного *разумным*, но мы не применяем этот термин к поведению камня.

Развитие и эволюция

Продолжая взаимодействовать со своей окружающей средой, живой организм проходит последовательность структурных изменений и со временем формирует свой собственный, индивидуальный путь структурного сопряжения. В каждой точке этого пути структура организма представляет собой запись предыдущих структурных изменений и, следовательно, предыдущих взаимодействий. Живая структура — это всегда запись предыдущего развития, и онтогенез — ход развития индивидуального организма — это история структурных изменений организма.

Таким образом, поскольку структура организма в любой точке своего развития представляет запись его предыдущих структурных изменений и поскольку каждое структурное изменение влияет на последующее поведение организма, то из этого следует, что поведение живого организма определяется его структурой. Так, с разных сторон, живая система определяется своим паттерном организации и своей структурой. Паттерн организации определяет своеобразие системы (т. е. ее существенные черты); структура, сформированная последовательностью структурных изменений, определяет поведение системы. По терминологии Матураны, поведение живых систем *структурно детерминировано*.

Эта концепция структурного детерминизма бросает новый свет на старые философские споры о свободе и детерминизме. Согласно Матуране, поведение живого организма детерминировано. Однако оно детерминировано не внешними силами, а самой структурой организма — структурой, образовавшейся через последовательность автономных структурных изменений. Получается, что поведение живого организма и детерминировано, и свободно.

Больше того, факт структурной детерминированности поведения не означает, что оно предсказуемо. Структура организма просто «обуславливает ход своих взаимодействий и ограничивает структурные изменения, которые могут быть вызваны этими взаимодействиями»⁵². Например, когда живая система достигает точки бифуркации, как это описано у Пригожина, ее история структурного сопряжения будет определять новые ставшие возможными направления; но по какому направлению пойдет система, остается непредсказуемым.

Как и пригожинская теория диссипативных структур, теория автопоэза показывает, что творчество — создание все новых и новых конфигураций

— является ключевым свойством всякой живой системы. Особая форма такого творчества — порождение разнообразия через воспроизведение, начиная от простого деления клетки и вплоть до чрезвычайно сложного танца полового размножения. Для большинства живых организмов онтогенез — это не линейный путь развития, но Цикл, и воспроизведение является жизненно важной частью этого Цикла.

Миллиарды лет тому назад объединенные способности живых систем к воспроизведению и созданию новизны естественным образом привели к биологической эволюции — творческому раскрытию жизни, которое в виде непрерывного процесса продолжается до сих пор. От самых архаических и простых форм жизни до самых запутанных и сложных современных форм — на этом поле жизнь развернула непрерывный танец, никогда не нарушая основной паттерн своих автопоэзных сетей.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 9

1. См. выше, с. 105.

2. См. выше, с. 114.

3. См. выше, с. 124 и далее.

4. См. выше, с. 100—101.

5. Von Neumann (1966).

6. См. Gardner (1971).

7. В каждом квадрате (3x3) имеется центральная клетка, окруженная 8 соседями.

Если три соседние клетки черные, центральная клетка становится черной на следующем шаге («рождение»); если две соседние клетки черные, центральная клетка остается без изменений («выживание»); во всех других случаях клетка становится белой («смерть»).

8. См. Gardner (1970).

9. Великолепный отчет по истории и применению клеточных автоматов см. в Farmer, Toffoli and Wolfram (1984), в особенности предисловие Стивена Вольфрама. Более позднее собрание технических статей см. в Gutowitz (1991).

10. Varela, Maturana, and Uribe (1974).

11. Эти передвижения и взаимодействия могут быть формально выражены как математические правила перехода, применяемые одновременно ко всем клеткам.

12. Некоторые из соответствующих математических вероятностей служат переменными параметрами модели.

13. Вероятность распада не должна превышать 0,01 за временной шаг, чтобы вообще могла быть создана жизнеспособная структура, а граница должна со держать не менее 10 звеньев; подробности см. в Varela, Maturana and Uribe (1974).

14. См. Kauffman (1993), pp. 182ff; краткое резюме см. в Kauffman (1991).

15. См. выше, с. 145 и далее. Заметьте, однако, что, поскольку значения двоичных переменных изменяются дискретно, то и их фазовое пространство тоже будет дискретным.

16. См. Kauffman (1993), p. 183.

Самосозидание

17. См. там же, p. 191.

18. См. там же, pp. 441 ff.

19. См. выше, с. 83 и далее.

20. Varela et al. (1992), p. 188.

21. Kauffman(1991).
22. См. Kauffman (1993), p. 479. 23. Kauffman(1991).
24. См. Luisi and Varela (1989), Bachmann et al. (1990), Walde et al. (1994).
25. См. Fleischaker (1990).
26. Недавние дискуссии по вопросам, обсуждаемым ниже, см. в Fleischaker (1992), а также Mingers (1995).
27. Maturana and Varela (1987), p. 89.
28. См. ниже, с. 307 и далее.
29. Maturana and Varela (1987), p. 199.
30. См. Fleischaker (1992); Mingers (1995), p. 119.
31. Mingers (1995), p. 127.
32. См. Fleischaker (1992), pp. 131— 141; Mingers (1995), pp. 125— 126.
33. Maturana (1988); см. также ниже, с. 310— 312.
34. Varela (1981).
35. Luhmann(1990).
36. См. выше, с. 121.
37. См. выше, с. 117 и далее.
38. Lovelock (1991), pp. 31 ff.
39. См. выше, с. 227— 228.
40. См. выше, с. 110— 111.
41. См. Lovelock (1991), pp. 135— 136.
42. Harding (1994).
43. См. Margulis and Sagan (1986), p. 66.
44. Margulis (1993); Margulis and Sagan (1986).
45. См. ниже, с. 256 и далее.
46. Margulis and Sagan (1986), pp. 14, 21.
47. Там же, p. 271.
48. Цитируется по Capra (1975), p. 183.
49. См. ниже, с. 253 и далее.
50. См. Lovelock (1991), p. 127.
51. См. Maturana and Varela (1987), pp. 75ff.
52. Там же, p. 95.

Глава 10

Раскрытие жизни

Одна из самых замечательных особенностей зарождающейся теории живых систем — необходимо вытекающее из нее новое понимание эволюции. Взгляд на эволюцию как на результат случайных мутаций и естественного отбора сменяется признанием творческого раскрытия Жизни, непрерывно возрастающего разнообразия и сложности — этих неотъемлемых характеристик всякой живой системы. Хотя мутация и естественный отбор по-прежнему признаются важными аспектами биологической эволюции, основное внимание ученых теперь сосредоточено на творчестве, непрерывном стремлении Жизни к обновлению.

Чтобы глубже понять фундаментальное различие между старыми и новыми взглядами на эволюцию, рассмотрим кратко историю эволюционной мысли.

Дарвинизм и неodarвинизм

Первая теория эволюции была сформулирована в начале XIX столетия Жаном Батистом Ламарком, натуралистом-самоучкой, который ввел термин *биология* и провел обширные исследования в области ботаники и зоологии. Ламарк наблюдал, как животные меняются под воздействием окружающей среды, и полагал, что они могут передавать эти изменения своему потомству. Именно эта передача приобретенных характеристик представлялась ему основным механизмом эволюции.

И хотя оказалось, что Ламарк в этом отношении ошибался, его признание феномена эволюции — появления новых биологических форм в истории видов — стало революционным открытием, в значительной степени повлиявшим на последующее развитие этого направления научной мысли. Ламарк оказал сильное влияние на Чарльза Дарвина, который начинал свою научную карьеру как геолог, но во время знаменитой экспедиции на Галапагосские острова заинтересовался биологией. Тщательное изучение фауны острова побудило Дарвина к размышлениям о влиянии географической изоляции на образование видов и привели его в конце концов к формулировке теории эволюции.

Дарвин опубликовал теорию в 1859 году в своей монументальной работе *«Происхождение видов»*, а еще через двенадцать лет дополнил ее трудом *«Происхождение человека»*, в котором концепция эволюционной трансформации одних видов в другие расширяется, включая человека. В основу теории Дарвина положены две фундаментальные идеи — случайное отклонение (позже его стали называть случайной мутацией) и естественный отбор.

Центральной в этой теории стала догадка, что все живые организмы

связаны общим происхождением. Все формы жизни произошли от неких общих предков путем непрерывного процесса отклонений развития в течение миллиардов лет геологической истории. В этом эволюционном процессе производится гораздо больше разновидностей, чем может выжить, поэтому многие особи исчезают в результате естественного отбора; но некоторые варианты выживают и дают жизнь потомкам.

В настоящее время эти фундаментальные идеи подробно описаны и подтверждены обширным массивом свидетельств из биологии, биохимии и палеонтологии, и ни один серьезный ученый не подвергает их ни малейшему сомнению. Различия между классической теорией эволюции и зарождающейся новой теорией сосредоточены вокруг *динамики эволюции* — механизмов, посредством которых осуществляются эволюционные изменения.

Собственная концепция Дарвина относительно случайных отклонений базировалась на предположении, весьма характерном для взглядов XIX века на наследственность. Предполагалось, что биологические свойства особи представляют некую «смесь» соответствующих свойств ее родителей, которые вносят в эту смесь более или менее равный вклад. Это означало, что потомок родителя с полезным случайным отклонением унаследует лишь 50% нового свойства и впоследствии сможет передать только 25% этого свойства следующему поколению. Таким образом, новое свойство будет быстро затухать, сохраняя ничтожные шансы на сохранение в ходе естественного отбора. Сам Дарвин признавал, что Это серьезный недостаток его теории, который он не может исправить.

Интересно, что проблему Дарвина разрешил Грегор Мендель, австрийский монах и ботаник-любитель, и произошло это всего несколько лет спустя после публикации дарвиновской теории. Однако открытие Менделя не было замечено при его жизни и вновь увидело свет лишь в начале XX века, через много лет после его смерти. Основываясь на своих тщательных экспериментах с цветным горохом, Мендель пришел к выводу, что существуют «единицы наследственности» (впоследствии названные генами), которые не смешиваются в процессе воспроизведения, а, напротив, передаются из поколения в поколение, не меняя своей идентичности. Это открытие привело к предположению, что случайные мутации генов не исчезают в течение нескольких поколений, но сохраняются, чтобы в дальнейшем закрепиться — либо исчезнуть полностью — в ходе естественного отбора.

Открытие Менделя не только сыграло решающую роль в становлении теории эволюции Дарвина, но и сформировало новое поле исследований — изучение наследственности путем исследования химической и физической природы генов¹. Британский биолог Уильям Бэйтсон,

страстный приверженец и популяризатор трудов Менделя, в начале века назвал эту новую область *генетикой*. Между прочим, своего младшего сына он назвал Грегором в честь Менделя.

Комбинация дарвиновской идеи постепенных эволюционных изменений с открытой Менделем генетической устойчивостью привела к образованию синтеза, известного как *неодарвинизм*, который сегодня преподается на биологических факультетах мира как общепризнанная теория эволюции. Согласно неодарвинистской теории, все эволюционные вариации являются следствиями случайных мутаций, т. е. случайных генетических изменений, за которыми следует естественный отбор. Например, если какой-либо вид животных нуждается в густой шерсти, чтобы выжить в холодном климате, он не отвечает на эту потребность отращиванием шерсти, но, вместо этого, развивает все виды *случайных* генетических изменений, и те особи, чьи изменения вызвали появление густой шерсти, выживают и производят потомство. Таким образом, по словам генетика Жака Моно, «одна лишь случайность лежит в истоках всякого новшества у всех обитателей биосферы»².

По мнению Линн Маргулис, неодарвинизм фундаментально несостоятелен не только потому, что основан на давно устаревших редуccionистских понятиях, но и потому, что был сформулирован на неадекватном математическом языке. «Язык жизни — это не просто обычная арифметика и алгебра, — утверждает Маргулис, — язык жизни — это химия. Практикующим неодарвинистам не хватает соответствующих знаний, например, в микробиологии, биологии клеток, биохимии... и экологии микробов»³.

Одна из причин того, что в наше время ведущие эволюционисты не владеют надлежащим языком для описания эволюционных изменений, по мнению Маргулис, кроется в том, что большинство из них связаны с зоологической традицией и, следовательно, привыкли иметь дело лишь с небольшой, сравнительно недавней частью эволюционной истории. Новейшие исследования в области микробиологии несомненно указывают на то, что главные направления эволюционного творчества сформировались задолго до того, как на сцене появились животные⁴.

Похоже, что центральная проблема неодарвинизма состоит в его редуccionистской концепции генома — набора всех генов организма. Великие достижения молекулярной биологии, часто именуемые «разгадкой генетического кода», вылились в тенденцию изображать геном в виде линейной цепи независимых генов, каждый из которых соответствует конкретному биологическому признаку.

Однако исследования показали, что отдельный ген может влиять на широкий спектр признаков и, наоборот, часто один лишь признак

определяется множеством генов. Таким образом, остается загадкой, как такие сложные структуры, как глаз или цветок, могли развиваться путем последовательных мутаций отдельных генов. Настоятельная необходимость изучения координирующей и интегрирующей деятельности всего генома очевидна, однако этому решительно препятствует механистическое мировоззрение, царящее в традиционной биологии. Лишь совсем недавно биологи пришли к пониманию генома живого организма как глубочайшим образом переплетенной сети и начали изучать деятельность этой сети исходя из системной точки зрения⁵.

Системный взгляд на эволюцию

Поразительным проявлением генетической целостности стал теперь Уже основательно подтвержденный факт, что эволюция не всегда совершалась в виде непрерывных постепенных изменений, обусловленных Продолжительными цепочками последовательных мутаций. Результаты изучения ископаемых материалов ясно показывают, что на всем протяжении эволюционной истории встречались продолжительные периоды стабильности, или стазиса, не отмеченные генетическими отклонениями, а затем эти периоды сменялись внезапными резкими переходами. Вполне нормальными являются устойчивые периоды протяженностью в сотни тысяч лет. Чтобы не ходить далеко, человеческое эволюционное приключение тоже началось с миллиона лет стабильности первого гоминида, *Australopithecus afarensis*⁶. Новая картина эволюции, известная как «пунктирные равновесия», показывает, что внезапные переходы были вызваны механизмами, совершенно отличными от случайных мутаций неodarвинистской теории.

Важным аспектом классической теории эволюции является идея о том, что в ходе эволюционных изменений и под давлением естественного отбора организмы постепенно приспосабливаются к окружающей среде, пока не достигнут состояния, достаточно благоприятного для выживания и воспроизведения. В новом системном подходе, наоборот, эволюционные изменения рассматриваются как результат присущей жизни тенденции к созданию нового, причем этот процесс может сопровождаться, но может и не сопровождаться адаптацией к изменяющимся условиям.

Соответственно, системные биологи стали изображать геном как самоорганизующуюся сеть, способную к спонтанному производству новых форм порядка. «Мы должны переосмыслить эволюционную биологию, — пишет Стюарт Кауфман. — Большая часть порядка, который мы наблюдаем в организмах, может быть прямым результатом не естественного отбора, но естественного порядка, привилегию работать над которым получил отбор... Эволюция — это не просто "починка на скорую руку"... Это внезапно возникающий порядок, выпестованный и

отточенный отбором»⁷.

Всеобъемлющая новая теория эволюции, основанная на недавних открытиях, еще не сформулирована полностью. Однако модели и теории самоорганизующихся систем, о которых шла речь в предыдущих главах этой книги, открывают возможность такой формулировки. Пригожинская теория диссипативных структур показывает, как далекие от равновесия сложные биохимические системы вырабатывают каталитические циклы, приводящие к неустойчивым состояниям и способные производить новые структуры более высокого порядка. Манфред Эйген предположил, что подобные каталитические циклы могли сформироваться еще до появления жизни на Земле, открыв тем самым предбиологическую фазу эволюции. Стюарт Кауфман использовал двоичные сети в качестве математических моделей генетических сетей живых организмов и смог вывести из них несколько известных особенностей видоизменения и эволюции клетки. Умберто Матурана и Франциско Варела описали процесс эволюции в контексте своей теории автопоэза, рассматривая эволюционную историю вида как историю его структурного сопряжения. И, наконец, Джеймс Лавлок и Линн Маргулис в своей Гайя-теории исследовали планетарные измерения раскрытия жизни.

Гайя-теория, равно как и ранние работы Линн Маргулис в области микробиологии, выявила несостоятельность узконаправленной дарвинистской концепции приспособления. В реальном живом мире во всей его целостности эволюция не может быть ограничена приспособлением организмов к окружающей среде, поскольку сама эта среда формируется сетью живых систем, способных к приспособлению и творчеству. В таком случае, что же и к чему приспособливается? Каждый к каждому — это коэволюция. По словам Джеймса Лавлока:

Эволюция живых организмов настолько тесно сопряжена с эволюцией окружающей их среды, что вместе они составляют единый эволюционный процесс⁹.

Таким образом, фокус нашего внимания смещается от эволюции к коэволюции — непрерывному танцу, хореография которого обусловлена тонким взаимодействием конкуренции и кооперации, созидания и обоюдного приспособления.

Направления творчества

Итак, движущую силу эволюции, согласно зарождающейся новой теории, следует искать не в случайных событиях беспорядочных мутаций, но в присущей жизни тенденции к созиданию нового, в спонтанном возникновении нарастающей сложности и порядка. Усвоив суть этого нового понимания, мы можем спросить: в каких же направлениях развивается и выражает себя творчество эволюции?

Ответ дает не только молекулярная биология, но и, что еще более важно, микробиология — изучение планетарной паутины мириад Микроорганизмов, которые оставались единственными формами жизни на Земле в течение двух миллиардов лет эволюции. За этот период бактерии непрерывно преобразовывали поверхность и атмосферу Земли и, выполняя эту работу, изобрели все существенные биотехнологии жизни, включая ферментацию, фотосинтез, связывание азота, дыхание и вращательные механизмы для быстрого передвижения.

Широкомасштабные исследования в микробиологии в течение последних трех десятилетий определили три основных направления эволюции¹⁰. Первое, хотя и наименее важное, представляет собой случайная мутация генов, центральная концепция неодарвинистской теории. Мутация вызывается случайной ошибкой при саморепродуцировании ДНК, когда две цепочки двойной спирали ДНК разъединяются и каждая из них служит шаблоном для построения новой дополнительной цепочки¹¹.

Частота возникновения таких случайных ошибок оценивается примерно как одна на несколько сотен миллионов клеток в каждом поколении. Такая частота, похоже, недостаточна для объяснения эволюции огромного разнообразия форм жизни, если учесть тот хорошо известный факт, что большинство мутаций губительны и лишь очень немногие обуславливают полезные отклонения.

Что же касается бактерий, то здесь ситуация несколько иная, поскольку бактерии делятся очень быстро. Они могут делиться примерно каждые двадцать минут, так что, в принципе, из одной менее чем за день может появиться несколько миллиардов отдельных бактерий. Благодаря этой невероятной скорости воспроизведения, один успешный бактериальный мутант может быстро распространиться в своей окружающей среде, а следовательно, мутации действительно представляют важное эволюционное направление для бактерий.

Однако бактерии же развили второе направление эволюционного творчества, притом гораздо более эффективное, чем случайные мутации. Они свободно передают наследственные черты (от одной к другой) в глобальной сети обмена, которая отличается невероятной мощностью и эффективностью. Вот как описывают ее Линн Маргулис и Дорион Саган:

Последние пятьдесят лет, или около того, ученые наблюдали, как [бактерии] быстро и просто передают различные биты генетического материала другим особям. Каждая бактерия в любой момент времени имеет в своем распоряжении дополнительные гены, иногда попавшие к ней от совершенно других штаммов, для выполнения функций, не предусмотренных в ее собственной ДНК. Некоторые из генетических

битов *рекомбинируют* с собственными генами клетки, другие отправляются дальше... Благодаря этой способности, все бактерии мира в значительной мере обладают доступом к единому резерву генов и следовательно, к адаптивным механизмам всего бактериального царства¹³.

Этот глобальный обмен генами, известный как рекомбинация ДНК, должен занять место среди наиболее поразительных открытий современной биологии. «Если бы генетические свойства микрокосма можно было распространить на более крупные существа, мы бы оказались в научно-фантастическом мире, — пишут Маргулис и Саган, — где зеленые растения делятся генами для фотосинтеза с соседними грибами, а люди могут благоухать или отращивать бивни, занимая гены, соответственно, у розы или моржа»¹⁴.

Скорость, с которой сопротивляемость лекарствам распространяется среди сообществ бактерий, — вот решающее подтверждение того, что эффективность их коммуникационной сети значительно превосходит эффективность адаптации посредством мутаций. Бактерии могут приспособиться к окружающим условиям в течение нескольких лет там, где более крупным организмам понадобились бы тысячи лет эволюционной адаптации. Таким образом, микробиология преподает нам урок здравого смысла, показывая, что технологии вроде генной инженерии и глобальной коммуникационной сети, которые мы считаем выдающимися достижениями нашей современной цивилизации, используются планетарной паутиной бактерий уже в течение миллиардов лет для регулирования жизни на Земле.

Непрерывный обмен генами среди бактерий помимо их основной цепочки ДНК приводит к поразительному разнообразию генетических структур. Это относится и к структуре вирусов, которые не являются автопозными системами в полном смысле, но представляют просто цепочки ДНК или РНК в протеиновой оболочке¹⁵. По утверждению канадского бактериолога Сорин Сонеа, бактерии, строго говоря, нельзя классифицировать как вид, поскольку все их цепочки могут потенциально разделять одни и те же наследственные черты и, что для них типично, заменять до 15% своего генетического материала ежедневно. «Бактерия — это не одноклеточный организм, — пишет Сонеа, — это незавершенная клетка... принадлежащая различным химерам, в зависимости от обстоятельств»¹⁶. Иначе говоря, все бактерии являются частью единой микрокосмической Паутины Жизни.

Эволюция через симбиоз

Мутации и рекомбинация ДНК (обмен генами) — вот два основных направления эволюции бактерий. А как же многоклеточные организмы остальных, более крупных форм жизни? Если случайные мутации не служат для них эффективным эволюционным механизмом и если они не

обмениваются генами, подобно бактериям, то как же эволюционировали эти высшие формы жизни? Ответ на этот вопрос был дан Линн Маргулис, открывшей третье, совершенно неожиданное направление эволюции. Это направление играет важнейшую роль во всех сферах биологии.

Микробиологам хорошо известно, что наиболее фундаментальное разделение всех форм жизни проходит не по линии «растения — животные», как полагает большинство людей, а между двумя типами клеток — обладающими и не обладающими ядром. Бактерии, эти простейшие формы жизни, не имеют клеточных ядер и поэтому называются также *прокариотами* («безъядерными клетками»), тогда как все другие клетки обладают ядрами и называются *эукариотами* («ядерными клетками»). Все клетки высших организмов обладают ядром; эукариоты существуют также в виде одноклеточных *небактериальных* микроорганизмов.

Изучая генетику, Маргулис заинтересовалась тем фактом, что в клетке с ядром не все гены находятся именно внутри ядра:

Нас всегда учили, что гены расположены в ядре и что ядро является основным управляющим элементом клетки. Еще только изучая генетику, я узнала, что существуют другие генетические системы, с другими паттернами наследственности. С самого начала меня заинтересовали незаконные гены, расположенные вне ядра¹⁷.

Изучая феномен более подробно, Маргулис выяснила, что все эти «незаконные гены» происходят от бактерий, а затем постепенно пришла к пониманию того, что они принадлежат отдельным живым организмам, маленьким живым клеткам, пребывающим внутри более крупных клеток.

Симбиоз, тенденция различных организмов жить в тесной связи друг с другом и часто внутри друг у друга (как бактерии в нашем кишечнике), — широко распространенный и хорошо известный феномен. Однако Маргулис пошла несколько дальше и предложила следующую гипотезу: долговременные формы симбиоза, включая бактерии и другие микроорганизмы, живущие внутри других, более крупных клеток, обусловили и продолжают обуславливать появление новых форм жизни. Маргулис опубликовала свою революционную гипотезу в середине 60-х годов и в течение последующих лет развила ее в зрелую теорию, известную теперь как *симбиогенез*. Согласно этой теории, создание новых форм жизни через постоянные симбиотические образования рассматривается как основное направление эволюции для всех высших организмов.

Наиболее поразительное свидетельство эволюции через симбиоз представляют так называемые митохондрии, «силовые станции» внутри большинства ядерных клеток¹⁸. Эти существенные составляющие всех

животных и растительных клеток выполняют функции клеточного дыхания; они содержат свой собственный генетический материал и воспроизводятся независимо, в том числе и по времени, от остальной части клетки. Маргулис предполагает, что митохондрии изначально были свободно мигрирующими бактериями, которые в древние времена вторглись в другие микроорганизмы и осели в них на постоянное жительство. «Слившиеся организмы продолжали эволюционировать в более сложные формы жизни, дышащие кислородом, — поясняет Маргулис. — Здесь, таким образом, мы наблюдаем эволюционный механизм более стремительный, чем мутация: симбиотический союз, который становится постоянным»¹⁹.

Теория симбиогенеза предполагает радикальный сдвиг представлений в эволюционной мысли. В то время как традиционная теория рассматривает раскрытие жизни лишь как процесс *расхождения* видов, Линн Маргулис утверждает, что образование новых сложных сущностей через симбиоз прежде независимых организмов всегда представляло более мощную и важную эволюционную силу.

Этот новый взгляд заставил биологов признать существенную важность кооперации в эволюционном процессе. Если социальные дарвинисты XIX столетия видели в природе лишь конкуренцию — «окровавленные клыки и когти Природы», как выразил это поэт Теннисон, — то мы сейчас начинаем рассматривать непрерывную кооперацию и взаимную зависимость всех форм жизни как центральный аспект эволюции. По словам Маргулис и Саган, «Жизнь взяла верх над планетой не в битве, но постепенно опутав ее сетью»²⁰.

Эволюционное раскрытие жизни в ходе миллиардов лет — это история, от которой захватывает дух. Движимая творчеством, присущим всем живым системам, и выраженная в трех отчетливо различных направлениях — мутациях, обмене генами и симбиозе — живая патина планеты распространялась и укреплялась, корректируемая естественным отбором, в виде форм неуклонно нарастающей сложности. Эта история замечательно рассказана Линн Маргулис и Дорион Саган в книге «*Микрокосмос*»; в значительной степени по материалам их книги написаны последующие страницы²¹.

Нет свидетельств существования какого-то плана, цели или причины в глобальном эволюционном процессе, и, следовательно, нет доказательств прогресса; и все же существуют вполне различимые паттерны развития/Один из них, известный как *конвергенция*, представляет собой тенденцию организмов к развитию сходных форм для решения сходных проблем, несмотря на различные родовые истории. Так, глаза развивались не один раз — в разные периоды времени и по разным направлениям — у

червей, улиток, насекомых и позвоночных. Подобным же образом, крылья независимо эволюционировали у насекомых, рептилий, летучих мышей и птиц. Похоже, что творчество природы не знает пределов.

Еще один поразительный паттерн представляют собой повторяющиеся катастрофы — своего рода планетарные точки бифуркации, за которыми следуют интенсивные периоды роста и совершенствования. Так, опасное падение процентного содержания водорода в земной атмосфере более чем два миллиарда лет назад привело к одной из величайших эволюционных инноваций — использованию воды в фотосинтезе. Миллионы лет спустя эта чрезвычайно успешная новая биотехнология породила катастрофический кризис загрязнения — накопление огромных объемов токсичного кислорода. Кислородный кризис, в свою очередь, обусловил эволюцию бактерий, дышащих кислородом: это оказалось еще одним из замечательных нововведений жизни. Позже, 245 миллионов лет назад, вслед за опустошительным, беспрецедентным вымиранием множества видов наступила быстрая эволюция млекопитающих; а 66 миллионов лет назад катастрофа, которая стерла динозавров с лица Земли, расчистила путь для эволюции первых приматов и, наконец, человеческих существ.

Эпохи жизни

Чтобы отразить схематически процесс раскрытия жизни на Земле, мы используем геологическую шкалу времени, на которой периоды измеряются в миллиардах лет. Процесс начинается с формирования планеты

Земля — огненного шара раскаленной лавы — примерно четыре с половиной миллиарда лет назад. Геологи и палеонтологи разбили эти 4,5 миллиарда лет на многочисленные периоды и подпериоды, обозначенные названиями типа «протерозой», «палеозой» или «плейстоцен». К счастью, нам не обязательно помнить все эти технические термины, чтобы представить себе основные стадии эволюции.

В эволюции жизни на Земле мы различаем три достаточно объемлющие эпохи, каждая из которых охватывает временной период от одного до двух миллиардов лет и состоит из нескольких отдельных стадий (см. таблицу на стр. 254). Первая эпоха — предбиотическая, в течение которой формировались условия для возникновения жизни. Она длилась один миллиард лет, от формирования Земли до возникновения начальных форм жизни — первых клеток — около 3,5 миллиардов лет назад. Вторая эпоха, длившаяся полных два миллиарда лет, — это эпоха микрокосма, когда бактерии и другие микроорганизмы изобрели все базовые процессы жизни и сформировали глобальные циклы обратной связи для саморегуляции системы Гайи.

Около 1,5 миллиардов лет назад были, в основном, сформированы

поверхность и атмосфера Земли в их нынешнем виде; микроорганизмы заполнили воздух, воду и почву, циклически перегоняя газы и питательные вещества по своей планетарной сети, как они делают это и сегодня; и, наконец, были созданы условия для перехода к третьей эпохе жизни — макрокосму, — эпохе эволюции более крупных форм жизни, включая и род человеческий.

Происхождение жизни

В течение первого миллиарда лет после формирования Земли постепенно складывались условия для появления жизни. Изначальный огненный шар был достаточно велик для того, чтобы удерживать атмосферу. Кроме того, он содержал основные химические элементы, из которых предстояло сформироваться строительным блокам жизни. Расстояние от Солнца оказалось оптимальным — достаточно далеким, чтобы начался процесс медленного охлаждения и конденсации, и в то же время достаточно близким, чтобы не наступило сжижение и замерзание газов.

После полумиллиарда лет постепенного охлаждения пар, наполнявший атмосферу, наконец сконденсировался; обильные дожди не прекращались тысячелетиями, и на поверхности Земли скопилось столько воды, что из нее образовались неглубокие океаны. В течение этого продолжительного периода углерод — химический костяк жизни — активно соединялся с водородом, кислородом, азотом, серой и фосфором, порождая бесконечное разнообразие химических соединений. Эти шесть элементов — С, Н, О, N, S, Р — и сейчас являются основными химическими ингредиентами всех живых организмов.

Эпохи жизни	Миллиардов назад	лет	Стадии эволюции
ПРЕДБИОТИЧЕСКАЯ ЭРА	4,5		формирование Земли
формирование условий для жизни	4,0		охлаждение огненного шара раскаленной лавы старейшие горные породы конденсация пара

	3,8	мелкие океаны соединения на углеродной основе каталитические циклы, мембраны
МИКРОКОСМ эволюция микроорганизмов	3,5	первые бактериальные клетки ферментация фотосинтез сенсорные механизмы, движение починка ДНК обмен генами
	2,8	тектонические платформы, континенты кислородный фотосинтез
	2,5	повсеместное распространение бактерий
	2,2	первые ядерные клетки
	2,0	закрепление кислорода в атмосфере
	1,8	дыхание на основе кислорода ¹
	1,5	формирование поверхности и атмосферы Земли
МАКРОКОСМ эволюция более	1,2 1,0	передвижение половое размножение

крупных форм жизни	0,8	митохондрии, хлоропласты
	0,7	первые животные
	0,6	раковины, скелеты
	0,5	первые растения
	0,4	сухопутные животные
	0,3	динозавры
	0,2	млекопитающие
	0,1	цветковые растения первые приматы

В течение долгих лет ученые обсуждали вероятность возникновения жизни из «химического супа», который настаивался по мере охлаждения планеты и расширения океанов. Было высказано немало гипотез о внезапных событиях, послуживших первичным толчком, — от драматической вспышки мощной молнии и вплоть до осеменения Земли макромолекулами посредством метеоритов. Другие ученые возражали, что вероятность наступления любого из этих событий практически равна нулю. Тем временем, как выяснилось в результате новейших исследований самоорганизующихся систем, нет принципиальной необходимости постулировать какое-либо внезапное событие.

Как отмечает Маргулис, «химические вещества соединяются не случайным образом, а упорядоченно, по определенным паттернам»²². Окружающая среда ранней Земли благоприятствовала образованию сложных молекул, ставших затем катализаторами для множества химических реакций. Постепенно различные каталитические реакции сомкнулись, образовав сложные каталитические паутины из замкнутых петель: сначала это были просто циклы, затем гиперциклы, затем структуры с сильной тенденцией к самоорганизации и даже самовоспроизведению²³. Когда была достигнута эта стадия, определилось и направление предбиологической эволюции. Каталитические циклы эволюционировали в диссипативные структуры и, проходя через последовательные нестабильные состояния (точки бифуркации), образовывали химические системы все большей сложности и разнообразия.

В конце концов эти диссипативные структуры начали формировать мембраны — сначала, видимо, из жирных кислот без протеинов, подобно недавно полученным в лаборатории мицеллам²⁴. Маргулис полагает, что именно тогда могли возникнуть многообразные самовоспроизводящиеся

химические системы, заключенные в мембрану; некоторое время они эволюционировали и исчезали, прежде чем появились первые клетки: «Должно было развиваться множество диссипативных структур, длинных цепочек различных химических реакций, которые эволюционировали, вступали в реакции и разрушались, прежде чем сформировалась и начала с высокой точностью воспроизводиться элегантная двойная спираль нашего древнего предка»²⁵. В этот период, около 3,5 миллиардов лет назад, зародились первые автопоэзные бактериальные клетки и началась эволюция жизни.

Как сплеталась бактериальная паутина

Существование первых клеток было шатким. Окружающая среда непрерывно менялась, и каждая случайность представляла новую угрозу их выживанию. Перед лицом всех враждебных сил — жесткого облучения солнечным светом, столкновений с метеоритами, наводнений, засух и извержений вулканов — бактериям приходилось захватывать и удерживать энергию, воду и пищу, чтобы оставаться живыми и целыми. Каждый кризис, несомненно, сметал значительную часть первых островков жизни с лица планеты, и это быстро закончилось бы полным уничтожением, если бы не две жизненно важные особенности тех первых форм: бактериальные ДНК способны к точному воспроизведению и осуществляют его с невероятной скоростью. В силу своего огромного количества бактерии снова и снова творчески реагировали на все угрозы и развивали разнообразные адаптивные стратегии. Так они постепенно распространялись, сначала в водной среде, а затем и в поверхностных слоях осадочных пород и почвы.

Очевидно, наиболее важная задача состояла в том, чтобы развить достаточное разнообразие метаболических способов извлечения энергии и пищи из окружающей среды. Одним из первых изобретений бактерий стала ферментация, т. е. расщепление Сахаров и преобразование их в *энергетические носители* — молекулы АТФ, которые подпитывают энергией все клеточные процессы²⁶. Эта инновация позволила бактериям, способным к ферментации, добывать химические вещества в земле, грязи и воде, защищаясь тем самым и от жесткого солнечного облучения.

Некоторые из *ферментаторов* выработали, помимо этого, способность поглощать азот из воздуха и перерабатывать его в различные органические соединения. *Связывание азота*, т. е. непосредственный захват его из воздуха, требует огромных затрат энергии, и даже сегодня эта задача под силу лишь немногим специализированным бактериям. Поскольку азот является ингредиентом протеинов во всех клетках, все ныне существующие организмы для своего выживания нуждаются в бактериях, связывающих азот.

В самом начале эпохи бактерий фотосинтез — «несомненно самое важное метаболическое усовершенствование в истории жизни на планете»²⁷ — стал первичным резервом жизненной энергии. Первые процессы фотосинтеза, изобретенные бактериями, отличались от тех, что сегодня происходят в растениях. Вместо воды в качестве источника водорода они использовали сероводород — газ, источаемый вулканами. Они соединяли его с солнечным светом и CO_2 воздуха, образуя органические соединения, и никогда не вырабатывали кислород.

Эти адаптивные стратегии не только позволяли бактериям выживать и развиваться, но и постепенно начали изменять окружающую их среду. Фактически именно бактерии, почти с самого начала своего существования, сформировали первые петли обратной связи, которые в конце концов должны были неминуемо привести к появлению тесно взаимосвязанной системы — жизни и ее окружения. И хотя химия и климат ранней Земли способствовали развитию жизни, это благоприятное состояние не могло бы поддерживаться бесконечно долго без бактериальной регуляции²⁸.

По мере того как железо и другие элементы вступали в реакции с водой, высвобождался газообразный водород; он поднимался сквозь атмосферу, где разлагался на атомы. Поскольку эти атомы слишком легки для того, чтобы их удерживало земное тяготение, весь водород должен был улечься, учитывая бесконтрольность процесса; через какой-нибудь миллиард лет всем океанам на планете предстояло исчезнуть. К счастью, вмешалась жизнь. На поздних стадиях фотосинтеза стал высвобождаться и поступать в воздух свободный кислород, как это происходит и сегодня, и некоторая его часть соединялась с восходящими потоками газообразного водорода, образуя при этом воду; так сохранялся определенный уровень влажности на планете и предотвращалось испарение океанов.

Тем не менее постоянный отбор CO_2 из атмосферы в процессе фотосинтеза вызвал другую проблему. В начале эпохи бактерий энергия солнечного излучения была на 25% меньше, чем сейчас, и CO_2 в атмосфере был совершенно необходим, чтобы создавать тепличный эффект и поддерживать температуру планеты в приемлемом диапазоне. Если бы отбор CO_2 происходил без какой-либо компенсации, Земля бы замерзла и ранние формы бактерий погибли бы.

Эта опасная тенденция была остановлена ферментирующими бактериями, которые, возможно, сформировались еще до появления фотосинтеза. В процессе производства молекул АТФ из Сахаров ферментаторы также вырабатывали метан и CO_2 в виде отходов. Последние поступали в атмосферу, где и восстанавливали планетарный тепличный эффект. Таким образом, ферментация и фотосинтез стали

взаимно балансирующими процессами системы ранней Гайи.

Солнечный свет, проходивший сквозь атмосферу древней Земли, все еще содержал обжигающую ультрафиолетовую радиацию, и теперь бактериям приходилось балансировать между защитой от облучения и необходимостью получать солнечную энергию для фотосинтеза. Это привело к эволюции многочисленных сенсорных систем и двигательных механизмов. Некоторые виды бактерий мигрировали в воды, богатые определенными солями, выполнявшими роль солнечных фильтров; другие нашли защиту в песке; а некоторые тем временем развили пигменты, в которых поглощались вредоносные лучи. Многие виды организовывали огромные колонии — многослойные «скатерти» из микробов, где верхние слои обжигались и умирали, но защищали нижний слой своими мертвыми телами²⁹.

Помимо защитной фильтрации, бактерии выработали также механизмы для починки ДНК, поврежденных радиацией, в том числе специально для этого предназначенные ферменты. Сегодня почти все организмы по-прежнему содержат в себе такие «ферменты-ремонтники» — еще одно пережившее миллиарды лет изобретение микрокосмоса³⁰.

Вместо того чтобы использовать для починки собственный генетический материал, бактерии иногда заимствовали фрагменты ДНК у своих соседей по густонаселенному окружению. Этот метод постепенно эволюционировал в непрерывный обмен генами, который и определил самое эффективное направление эволюции бактерий. У высших форм жизни рекомбинация генов различных особей связана с воспроизведением, но в мире бактерий два эти феномена протекают независимо. Бактериальные клетки воспроизводятся бесполым путем, но зато они непрерывно обмениваются генами. По словам Маргулис и Саган,

Мы обмениваемся генами «вертикально» — через поколения, — тогда как бактерии меняются ими «горизонтально» — непосредственно со своими соседями из того же поколения. В результате получается, что генетически неустойчивые бактерии функционально бессмертны, а для эукариотов пол связан со смертью³¹.

Из-за небольшого числа постоянных генов в бактериальной клетке — как правило, меньше одного процента от числа генов в ядерной клетке — бактерии по необходимости работают командами. Разные виды сотрудничают и помогают друг другу, предоставляя дополнительный генетический материал. Крупные сообщества таких бактериальных команд могут функционировать с согласованностью единого организма, выполняя задачи, которые индивидуально не под силу никакой из них.

К концу первого миллиарда лет с момента возникновения жизни Земля

кишела бактериями. Были изобретены тысячи биотехнологий — большинство из них, безусловно, известно сегодня, — и, посредством сотрудничества и непрерывного обмена генами, микроорганизмы начали регулировать условия для жизни на всей планете, как они делают это и поныне. Фактически многие виды бактерий ранней эпохи микрокосма дожили, существенно не изменившись, до наших дней.

В ходе последующих стадий эволюции, микроорганизмы образовывали союзы и эволюционировали совместно с растениями и животными, и сегодня наша окружающая среда в такой степени переполнена бактериями, что почти невозможно определить, где кончается неодушевленный мир и где начинается жизнь. Мы склонны ассоциировать бактерии с болезнью, но они жизненно важны и для нашего выживания, равно как и для выживания животных и растений. «Если отбросить в сторону наши поверхностные различия, можно сказать, что все мы представляем собой ходячие сообщества бактерий, — пишут Маргулис и Саган. — Весь мир мерцает, как ландшафт пуантилиста, составленный из крошечных живых существ»³².

Кислородный кризис

Вследствие того, что бактериальная паутина разворачивалась и заполняла все доступные пространства в водах, скалах и грязевых низинах, ее энергетические потребности привели к серьезному водородному истощению атмосферы. Углеводы, играющие существенную роль во всех процессах жизни, представляют собой сложные структуры из атомов углерода, водорода и кислорода. Чтобы построить эти структуры, фотосинтезирующие бактерии извлекали углерод и кислород в виде CO_2 , подобно современным растениям. Кроме того, они получали водород в форме газа из воздуха и из сероводорода, извергающегося из вулканов. Однако легкий газообразный водород продолжал улетучиваться в космос, и со временем одного сероводорода стало не хватать.

Огромное количество водорода, конечно, есть в воде (H_2O), однако связи между молекулами водорода и кислорода в воде гораздо прочнее, чем между двумя атомами водорода в его газе (H_2) или в сероводороде (H_2S). Бактерии, осуществляющие фотосинтез, не были способны разорвать эти крепкие связи, пока особый вид сине-зеленых бактерий не изобрел новый тип фотосинтеза, который навсегда решил проблему водорода.

Новый эволюционный тип бактерий, предков современных сине-зеленых водорослей, использовал солнечный свет с более высокой энергией (с более короткими длинами волн) для того, чтобы расщеплять молекулы воды на составляющие их водород и кислород. Они забирали водород для формирования Сахаров и других углеводов, а кислород

уходил в воздух. Это изъятие водорода из воды, представляющей один из наиболее обильных ресурсов планеты, стало чрезвычайной эволюционной победой, которая очень глубоко повлияла на последующее раскрытие жизни. И Линн Маргулис убеждена в том, что «пришествие кислородного фотосинтеза было тем исключительным событием, которое в конечном итоге привело к формированию нашей современной окружающей среды»³³.

Благодаря неограниченным запасам водорода, новые бактерии достигли небывалых успехов. Они быстро распространялись по поверхности Земли, покрывая камни и песок сине-зеленой пленкой. И даже сегодня они вездесущи, прорастая в прудах и бассейнах, на влажных стенах и ставнях — везде, где доступен солнечный свет и вода.

Однако этот эволюционный успех был оплачен дорого. Как и все быстро распространяющиеся живые системы, сине-зеленые бактерии производили отходы в огромных количествах, и в данном случае отходы оказались крайне токсичными. Это был газообразный кислород — побочный продукт нового типа фотосинтеза на основе воды. Свободный кислород токсичен потому, что он легко вступает в реакции с органическими веществами, производя так называемые *свободные радикалы*, которые оказывают весьма разрушительное воздействие на углеводы и другие важные биохимические соединения. Так же легко кислород вступает в реакции с атмосферными газами и металлами, вызывая сгорание или коррозию — две наиболее знакомые формы *окисления*, т. е. соединения вещества с кислородом.

Поначалу Земля легко поглощала кислородные отходы. Вулканические и тектонические источники поставляли достаточно металлов и серных соединений, которые быстро связывали свободный кислород, не давая ему закрепиться в воздухе. Однако абсорбируя кислород в течение миллионов лет, связывающие кислород металлы и минералы насытились, и тогда токсичный газ стал накапливаться в атмосфере.

Около двух миллиардов лет назад кислородное загрязнение привело к катастрофе в беспрецедентных глобальных масштабах. Многочисленные виды исчезли полностью, и всей бактериальной паутине пришлось фундаментально перестраиваться, чтобы выжить. Было развито множество защитных механизмов и адаптивных стратегий, и, наконец, кислородный кризис привел к одной из величайших и наиболее удачных инноваций во всей истории жизни:

Осуществляя один из величайших переворотов всех времен, [сине-зеленые] бактерии изобрели метаболическую систему, которой требовалось то самое вещество, которое представляло собой смертельный яд... Дыхание кислородом — это исключительно

эффективный способ отвода и использования реактивности кислорода. Это — идеально контролируемое сгорание, в котором расщепляются органические молекулы и производятся углекислый газ и вода, а в придачу огромное количество энергии... Микрокосм сделал больше, чем просто приспособился: он изобрел работающую на кислороде машину, которая навсегда изменила саму жизнь и ее земную обитель³⁴.

С этим замечательным изобретением в распоряжении сине-зеленых бактерий оказались два дополнительных механизма — генерация свободного кислорода через фотосинтез и его поглощение через дыхание. Теперь они могли приступить к формированию петель обратной связи, которые впредь будут регулировать содержание кислорода в атмосфере, поддерживая здесь тонкий баланс, необходимый для развития новых форм, дышащих кислородом³⁵.

Содержание свободного кислорода в атмосфере в итоге стабилизировалось на 21%. Это значение определилось порогом воспламеняемости. Если бы содержание кислорода упало до 15%, *ничто* не могло бы гореть. Организмы не смогли бы дышать и погибли бы. Если бы содержание кислорода в воздухе поднялось до 25%, то сгорело бы *все*. Возгорание происходило бы спонтанно, и всю планету охватили бы пожары.

И Гайя в течение миллионов лет поддерживала атмосферный кислород на уровне, наиболее благоприятном для всех растений и животных. Кроме того, в верхних слоях атмосферы постепенно образовался слой озона (трехатомных молекул кислорода), и с тех пор он защищает жизнь на Земле от жесткого ультрафиолетового излучения Солнца. Так была подготовлена сцена для появления и эволюции более крупных форм жизни — грибов, растений и животных; все это произошло уже в сравнительно короткие сроки времени.

Ядерная клетка

Первым шагом в направлении высших форм жизни стал симбиоз — новое направление эволюционного творчества. Это случилось около 2,2 миллиардов лет назад и привело к эволюции *эукариотических* («ядерных») клеток, которые в дальнейшем стали фундаментальными элементами всех растений и животных. Ядерные клетки гораздо крупнее и сложнее, чем бактерии. Если бактериальная клетка содержит единственную цепочку ДНК, свободно плавающую в клеточной жидкости, то ДНК в эукариотической клетке плотно закручена в хромосомы, которые заключены в мембрану внутри клеточного ядра. Количество ДНК в ядерных клетках в сотни раз больше, чем в бактериях.

Еще одной поразительной особенностью ядерной клетки является

обилие органелл — поглощающих кислород маленьких частиц, которые выполняют ряд исключительно специализированных функций³⁶. Анализ внезапного появления ядерных клеток в истории эволюции, а также открытие органелл как отдельных самовоспроизводящихся организмов привело Линн Маргулис к заключению, что ядерные клетки развились в результате длительного симбиоза — постоянного сосуществования различных бактерий и других микроорганизмов³⁷.

Предками митохондрий и других органелл могли быть бактерии-уродцы, которые вторгались в более крупные клетки и воспроизводили себя внутри них. Многие из завоеванных клеток, очевидно, погибали, а вместе с ними и их завоеватели. Однако некоторые хищники не уничтожили своих хозяев, но стали сотрудничать с ними, и в конце концов естественный отбор позволил выжить и эволюционировать лишь организмам, склонным к сотрудничеству. Возможно, клеточные мембраны развились как средство защиты генетического материала клеток-хозяев от нападения завоевателей.

За миллионы лет взаимоотношения, основанные на сотрудничестве, стали еще более координированными и тесными, причем органеллы производили потомство, хорошо приспособленное к жизни внутри более крупных клеток, а крупные клетки становились все более зависимыми от своих постояльцев. Со временем бактериальные сообщества стали до такой степени взаимозависимы, что могли функционировать лишь как единые, целостные организмы:

Жизнь продвинулась еще на один шаг, от создания сетей свободного генетического обмена к синергии симбиоза. Отдельные организмы сливались воедино, образуя новые целостности, которые представляли собой нечто большее, чем сумма их частей³⁸.

Признание симбиоза как главной эволюционной силы имеет важный философский подтекст. Все крупные организмы, включая и нас самих, служат живыми свидетельствами того факта, что деструктивные поведенческие механизмы на большой дистанции несостоятельны. В конце концов агрессоры всегда уничтожают самих себя и расчищают путь для тех, кто знает, как сотрудничать и развиваться. Жизнь в гораздо меньшей степени является конкурентной борьбой за выживание, чем триумфом сотрудничества и творчества. Действительно, со времени создания первых ядерных клеток эволюция шла через все более сложные формы сотрудничества и коэволюции.

Эволюционный путь через симбиоз позволил новым формам жизни многократно и всесторонне использовать хорошо опробованные специализированные технологии в разных комбинациях. Например, хотя бактерии получают пищу и энергию, применяя огромное разнообразие

остроумных методов, из их метаболических нововведений животными используется только кислородное дыхание — специальная функция митохондрий.

Митохондрии присутствуют и в растительных клетках, которые, кроме того, содержат так называемые хлоропласты — зеленые «солнечные станции», ответственные за фотосинтез³⁹. Эти органеллы замечательным образом напоминают сине-зеленые бактерии, которые, по всей вероятности, и были их предками. Маргулис полагает, что проникающие бактерии, как правило, переваривались завоеванными микроорганизмами, но некоторые разновидности, очевидно, сопротивлялись этому перевариванию внутри хозяев⁴⁰. Они приспособлялись к новому окружению, продолжая вырабатывать энергию через фотосинтез; более крупные клетки вскоре стали зависимы от поступления этой энергии.

Обеспечив ядерным клеткам доступ к эффективному использованию солнечного света и кислорода, новые симбиотические взаимоотношения дали им и третье великое эволюционное преимущество — возможность двигаться. Если компоненты бактериальной клетки медленно и пассивно плавают в клеточной жидкости, то составляющие ядерной клетки, похоже, передвигаются более осмысленно; клеточная жидкость течет единым потоком, и вся клетка может ритмично растягиваться или сокращаться или быстро передвигаться как единое целое — что видно на примере кровяных клеток.

Как и множество других жизненных процессов, быстрое движение было изобретено бактериями. Самый быстрый член микрокосма — крошечное, напоминающее волосок создание, названное *спирохетой* («скрученный волос») и известное также как «бактерия-штопор», поскольку движется по спирали подобно штопору. Прицепляясь симбиотически к более крупным клеткам, подвижная спирохета дает этим клеткам огромное преимущество быстрого перемещения — способности избегать опасности и искать пищу. Со временем бактерии-штопоры утратили свои индивидуальные черты и эволюционировали в хорошо известные «клеточные кнуты» — *flagellae*, *cilia*, и т. п., — которые служат средством перемещения для множества различных ядерных клеток, как бы подстегивая их своими волнообразными движениями.

Объединенные преимущества трех типов симбиоза, описанных в предыдущих параграфах, вызвали вспышку эволюционной активности, которая, в свою очередь, породила огромное разнообразие эукариотических клеток. Обладая двумя эффективными способами выработки энергии и радикально возросшей мобильностью, новые симбиотические формы жизни мигрировали в новые окружения, эволюционируя в первые растения и в первых животных, которым в конце

концов суждено было покинуть воду и выбраться на сушу.

Как научная гипотеза, концепция *симбиогенеза* — создания новых форм жизни через слияние различных видов — насчитывает едва тридцать лет. Но как культурный миф эта идея, похоже, стара, как само человечество⁴¹. Религиозные эпические творения, легенды, волшебные сказки и другие мифические истории всего мира населены фантастическими созданиями — сфинксами, русалками, грифонами, кентаврами и другими, — появившимися на свет в результате смешения одного или более видов. Как и клетки-эукариоты, эти создания состоят из хорошо знакомых компонентов, но их комбинации непривычны и поразительны.

Изображения этих гибридов зачастую ужасны, но многие из них, как это ни забавно, считаются приносящими удачу. Например, бог *Ганеша*, который обладает человеческим телом с головой слона, — один из наиболее почитаемых в Индии божеств; ему поклоняются как символу удачи и помощнику в преодолении препятствий. Похоже, что каким-то образом коллективному человеческому бессознательному с древнейших времен известно, что продолжительный симбиоз в высшей степени благотворен для всякой жизни.

Эволюция растений и животных

Эволюция растений и животных за пределы микрокосма осуществлялась через последовательность симбиозов, в которых бактериальные изобретения предыдущих двух миллиардов лет комбинировались в бесконечных проявлениях творчества, пока не были отобраны жизнеспособные формы. Для этого эволюционного процесса характерна возрастающая специализация — от органелл в первых эукариотах до исключительно специализированных клеток у животных.

Важным аспектом клеточной специализации является изобретение полового размножения около миллиарда лет тому назад. Мы привыкли думать, что пол и размножение тесно связаны между собой, однако, как отмечает Маргулис, сложный танец полового размножения состоит из нескольких отдельных компонентов, которые развивались независимо и только постепенно обрели взаимосвязь и единство⁴².

Первым компонентом является тип деления клетки, называемый *мейозом* («уменьшением»), при котором число хромосом в ядре уменьшается ровно наполовину. Так создаются специализированные клетки яйца и спермы. Затем эти клетки трансформируются в процессе оплодотворения, который восстанавливает нормальное число хромосом, и появляется новая клетка — оплодотворенное яйцо. В дальнейшем эта клетка последовательно делится в процессе роста и развития многоклеточного организма.

Слияние генетического материала двух разных клеток широко

распространено среди бактерий, где оно происходит в виде непрерывного обмена генами, который не связан с размножением. У ранних растений и животных появилась связь между размножением и слиянием генов, которая впоследствии эволюционировала в сложные процессы и ритуалы оплодотворения. Пол был более поздним усовершенствованием. Первые эмбриональные клетки — сперма и яйцо — были почти идентичными, но со временем они эволюционировали в маленькие, быстрые клетки спермы и большие неподвижные яйцеклетки. Связь между оплодотворением и формированием эмбриона образовалась еще позже, в процессе эволюции животных. В мире растений оплодотворение вылилось в сложные паттерны совместной эволюции цветов, насекомых и птиц.

По мере того как продолжалась специализация клеток в более крупных и сложных формах жизни, возможности, связанные с самовосстановлением и регенерацией, постепенно снижались. Плоские черви, полипы и морские звезды могут почти полностью регенерировать свои тела из маленьких частиц; ящерицы, саламандры, крабы, омары и многие насекомые все еще способны отращивать потерянные органы или конечности; однако для высших животных регенерация ограничена обновлением тканей в процессе заживания ран. Как следствие этой утери восстановительных функций, все крупные организмы подвержены старению и, в конечном счете, смерти. Тем не менее с половым размножением жизнь изобрела новый тип восстановительного процесса, в котором целые организмы опять и опять формируются заново, с каждым поколением возвращаясь к единичной ядерной клетке.

Растения и животные — не единственные многоклеточные создания в живом мире. Как и другие особенности живых организмов, многоклеточность эволюционировала неоднократно, по многим родословным древам жизни, и сегодня все еще существует несколько видов многоклеточных бактерий, а также множество многоклеточных протестов (микроорганизмов с ядерными клетками). Подобно животным и растениям, большинство видов этих многоклеточных организмов формируются последовательным делением клеток, но некоторые из них образуются как объединение клеток от разных, но принадлежащих одному и тому же виду источников.

Замечательный пример таких объединений дает слизистая плесень — макроскопический организм, но по своей конституции — протист. Простая слизистая плесень обладает сложным жизненным циклом, включающим подвижную (как у животных) и неподвижную (как у растений) фазу. В животной фазе она зарождается как массив отдельных клеток, которые обычно можно найти в лесу под гниющими бревнами и влажными листьями, где они питаются за счет других микроорганизмов и вянущей растительности. Часто эти клетки едят так много и делятся столь

стремительно, что полностью истощают пищевые ресурсы окружающей среды. Когда это происходит, они объединяются в связную массу из тысяч клеток, похожую на слизня и способную ползать по лесной почве, движениями напоминая амёбу. Найдя новый источник пищи, плесень вступает в свою растительную фазу, развивая ножку с плодородной мякотью, очень похожую на гриб. Наконец, плодовая коробочка взрывается, выстреливая наружу тысячи сухих спор, из которых появляются новые отдельные клетки; они теперь будут передвигаться независимо в поисках пищи, начиная новый цикл жизни.

Среди разнообразных многоклеточных организаций, которые развились из тесно связанных сообществ микроорганизмов, три — растения, грибы и животные — были столь удачны в отношении размножения, изменчивости и распространения по всей Земле, что биологи классифицировали их как *царства* — самые широкие категории живых организмов. Всего таких царств пять — бактерии (микроорганизмы без клеточного ядра), протисты (микроорганизмы с ядерными клетками), растения, грибы и животные⁴³. Каждое из царств иерархически делится на подкатегории, или *таксоны*, начиная с *типа* и кончая *родом* и *видом*.

Теория симбиогенеза позволила Линн Маргулис и ее коллегам построить классификацию живых организмов на ясных эволюционных взаимоотношениях. На рис. 10-1 в упрощенной форме показано, как протисты, растения, грибы и животные эволюционировали из бактерий через ряд последовательных симбиозов, подробно описанных ниже.

Следуя за эволюцией растений и животных, мы приходим к макрокосму и должны переключить наш временной диапазон с миллиардов лет на миллионы. Самые древние животные развились около 700 млн. лет назад, а первые растения возникли около 200 млн. лет спустя. И те, и другие сначала эволюционировали в воде и вышли на сушу 400—450 млн. лет назад, причем растения опередили животных на несколько миллионов лет. И растения, и животные развили огромные многоклеточные организмы, но если межклеточные связи в растениях минимальны, то клетки животных исключительно специализированы и тесно взаимосвязаны посредством множества сложных звеньев связи. Уровень взаимной координации и управления значительно возрос, когда стали развиваться первые нервные системы; примерно 620 млн. лет назад у животных появились зачатки мозга.

Предками растений были волокнистые массы водорослей, обитающие в мелких пронизанных солнцем водах. Время от времени воды высыхали, но некоторым водорослям удалось выжить, размножиться и превратиться в растения. У этих ранних растений, как у сегодняшних мхов, не было ни стволов, ни листьев. Чтобы выжить на суше, им было совершенно

необходимо развить стойкие структуры, которые противостояли бы истощению и засухе. Они выполнили эту задачу: они создали *лигнин* — материал для клеточных стенок, который позволил растениям сформировать крепкие стволы и ветви, а также сосудистые системы для подъема воды от корней к ветвям и листьям.

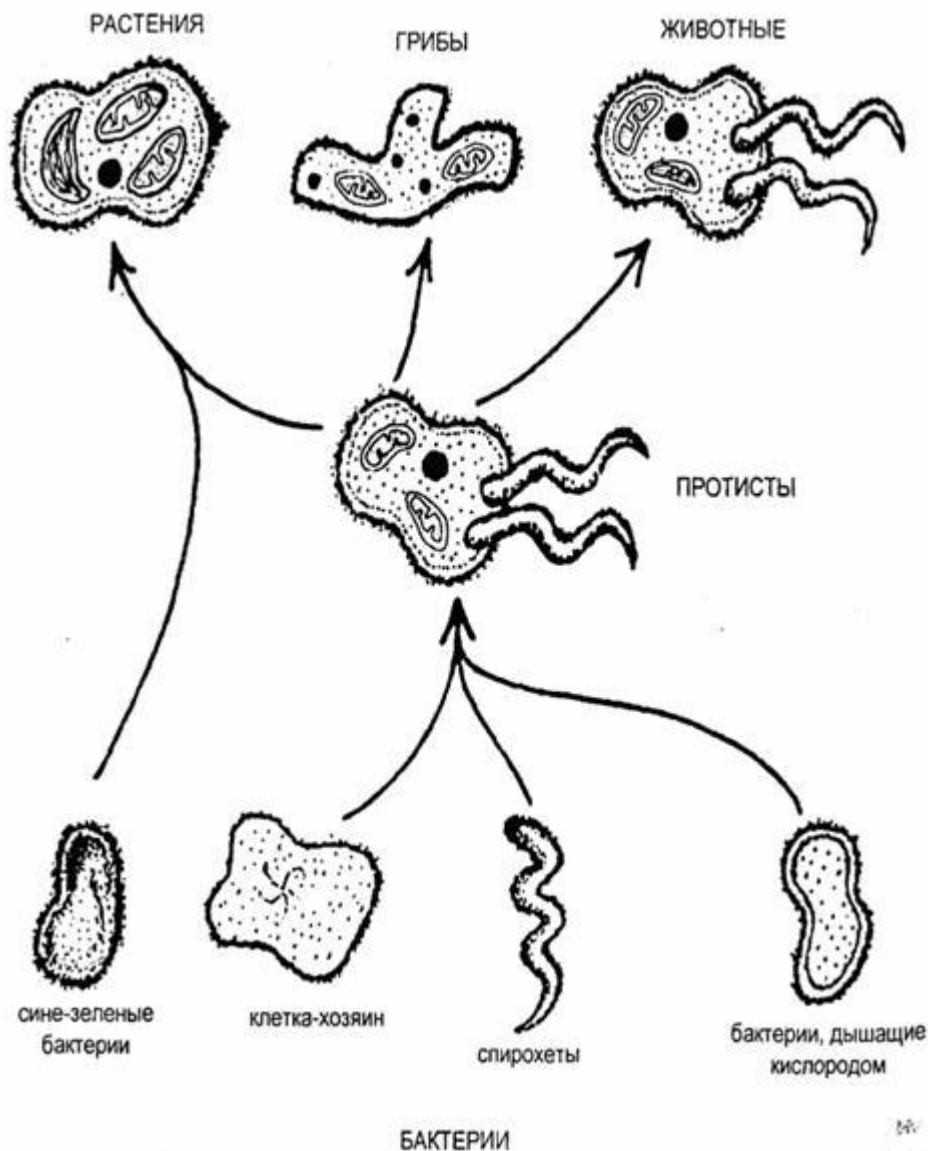


Рис. 10-1. Эволюционные взаимоотношения между пятью царствами жизни

Основной проблемой, возникшей в новом, наземном окружении, был недостаток воды. Творческий ответ растений выразился в том, что они заключили свой зародыш в защитное семя, противостоящее засухе. Теперь

они могли ждать со своим развитием до тех пор, пока не окажутся в достаточно влажной среде. Более чем сто миллионов лет, в то время, когда первые сухопутные животные — амфибии — эволюционировали в рептилий и динозавров, буйные тропические заросли *семенных папоротников* — фактически семенных деревьев, напоминающих гигантские папоротники, — покрывали огромные просторы Земли.

Около 200 миллионов лет назад на нескольких континентах появились ледники, и семенные папоротники не смогли пережить долгие холодные зимы. Их сменили вечнозеленые хвойные деревья, похожие на наши современные пихты и ели; высокая холодостойкость позволила им не только пережить зимы, но и завоевать высокогорные области. Еще сто миллионов лет спустя появились цветущие растения, чьи семена были заключены в плоды. С самого начала эти новые цветковые растения эволюционировали совместно с животными, которые с удовольствием поедали их питательные плоды и, в порядке любезности, распространяли непереваренные семена растений. Кооперативные связи продолжали развиваться, и сегодня в них включились люди — садовники, огородники и др., которые не только распространяют семена растений, но и разводят вегетативно бессеменные растения для получения от них плодов. Как замечают Маргулис и Саган, «похоже, что растения весьма сведущи в обоощении нас, животных, заставляя нас делать для них одну из немногих вещей, которая доступна нам, но недоступна им, — передвигаться»⁴⁴.

Завоевание суши

Первые животные эволюционировали в воде из сферических и червеобразных масс клеток. Они все еще были слишком малы, но некоторые из них формировали сообщества, которые коллективно строили огромные коралловые рифы в виде плотных кальциевых отложений. Не обладая твердыми частями или внутренними скелетами, ранние животные полностью разлагались после смерти, однако сотню миллионов лет спустя их потомки построили множество изысканных раковин и скелетов, которые оставили отчетливые отпечатки в хорошо сохранившихся ископаемых породах.

Для животных адаптация к жизни на суше стала эволюционным подвигом, потребовавшим решительных изменений в системе органов. Серьезнейшую проблему в условиях недостатка воды, конечно, представляло обезвоживание; хватало, однако, и других проблем. В атмосфере было неизмеримо больше кислорода, чем в океанах, что требовало других органов для дыхания; были необходимы различные типы кожи для защиты от нефилтрованного солнечного облучения; требовались более крепкие мускулы и кости, чтобы справляться с

гравитацией без помощи архимедовой силы.

Чтобы облегчить переход в это совершенно незнакомое окружение, животные изобрели весьма остроумный трюк. Они забрали с собой, ради юных особей, свое прежнее окружение. По сегодняшний день утроба животного имитирует влажность, текучесть и соленость древнего морского окружения. Более того, концентрация солей в крови и других телесных жидкостях млекопитающих замечательным образом соответствует концентрации солей в океане. Мы вышли из океана более 400 миллионов лет тому назад, но никогда не расставались с морской водой. Мы и теперь обнаруживаем ее в своей крови, поте и слезах.

Другое важное нововведение, которое стало существенным для жизни на суше, касалось регуляции содержания кальция. Кальций играет центральную роль в метаболизме всех ядерных клеток. В частности, он необходим для функционирования мышц. Для того чтобы эти метаболические процессы работали, количество кальция должно очень точно поддерживаться на определенных уровнях, гораздо более низких, чем в морской воде. Поэтому морским животным с самого начала пришлось непрерывно удалять весь избыточный кальций. Ранние животные просто выделяли свои кальциевые отходы, иногда нагромождая из них массивные коралловые рифы. По мере того как эволюционировали более крупные животные, они стали накапливать кальций вокруг и внутри себя, и эти отложения в конце концов превратились в раковины и скелеты.

Подобно тому как сине-зеленые бактерии преобразовали токсичный загрязнитель, кислород, в жизненно важный ингредиент своей дальнейшей эволюции, так ранние животные преобразовали другой серьезный загрязнитель, кальций, в строительный материал для новых структур, которые давали им огромные преимущества в ходе отбора. Раковины и другие твердые части использовались для защиты от хищников, тогда как скелеты, впервые появившиеся у рыб, впоследствии эволюционировали в важные поддерживающие структуры всех крупных животных.

Начало так называемого кембрийского периода (около 580 млн. лет назад) отмечено таким изобилием ископаемых пород с красивыми и четкими отпечатками раковин, твердых покровов и скелетов, что палеонтологи долгое время считали эти кембрийские породы свидетельствами начала жизни. Иногда их даже рассматривали как божественные следы первых актов творения. Лишь в последние три десятилетия следы микрокосма стали обнаруживать в так называемых «химических ископаемых»⁴⁵. Эти находки убедительно показывают, что зарождение жизни опережает кембрийский период почти на три миллиарда лет.

Эволюционные эксперименты с отложениями кальция привели к

огромному разнообразию форм — трубчатые «морские спринцовки» со спинным хребтом, но без костей; рыбообразные создания с внешним панцирем, но без челюстей; рыбы, дышащие как в воде, так и в атмосфере, и многие другие. Первые позвоночные со спинным хребтом и черепным костным скелетом, защищающим нервную систему, вероятно, появились около 500 миллионов лет назад. Среди них были предки рыб с легкими короткими плавниками, с челюстями и головой как у лягушки; они ползали вдоль берега и в конце концов эволюционировали в первых амфибий. Амфибии (земноводные) — лягушки, жабы, саламандры и тритоны — служат эволюционным связующим звеном между водными и сухопутными животными. Это первые наземные позвоночные, но даже сегодня они начинают свой жизненный цикл как головастики, дышащие в воде.

Первые насекомые вышли на берег примерно в то же время, что и амфибии, и, возможно, даже побудили некоторых рыб последовать за собой, представляя для них лакомую пищу. На суше насекомые породили неимоверное разнообразие видов. Малые размеры и высокая скорость размножения позволяли им приспосабливаться почти к любой окружающей среде, развивая фантастическое разнообразие телесных структур и режимов жизни. Сегодня известно около 750 000 видов насекомых, в три раза больше, чем всех остальных видов животных вместе взятых.

В течение 150 миллионов лет после выхода из моря амфибии эволюционировали в рептилий, обладавших значительными преимуществами при отборе — мощными челюстями, кожей, защищающей от засухи, и, что важнее всего, новым типом откладываемых яиц. Как это станут позже делать млекопитающие в своей утробе, рептилии заключили прежнюю среду обитания в большие яйца, внутри которых их отпрыски могли полностью подготовиться к жизненному циклу на суше. Вооруженные этими инновациями, рептилии быстро завоевали сушу и образовали множество разновидностей. Многие виды ящериц, которые существуют до сих пор, являются потомками этих древних рептилий.

Эволюция растений и животных

Млн лет	Стадии эволюции
700	ранние животные
620	зачатки мозга у животных
580	раковины и скелеты
500	позвоночные
450	растения выходят на сушу
400	амфибии и насекомые выходят на сушу

350	семенные папоротники
300	грибы
250	рептилии
225	хвойные и динозавры
200	млекопитающие
150	птицы
125	цветковые растения
70	вымирание динозавров
65	ранние приматы
35	мартышки
20	обезьяны
10	человекообразные обезьяны
4	прямоходящие «южные обезьяны»

Пока первое поколение рыб выбиралось из воды и превращалось в амфибий, на суше уже процветали кустарники и деревья, и когда амфибии превратились в рептилий, они очутились в густых тропических лесах. В это же время вышел на сушу третий тип многоклеточных организмов — грибы. Грибы похожи на растения, но в то же время столь отличны от них, что были выделены в особое царство, проявляющее ряд замечательных свойств⁴⁶. У них отсутствует зеленый хлорофилл для фотосинтеза, они не едят и не переваривают, но поглощают нужные питательные вещества непосредственно в форме химических соединений. В отличие от растений, грибы не обладают сосудистой системой для формирования корней, стеблей и листьев. У них есть вполне различные клетки, которые могут содержать несколько ядер и отделяются друг от друга тонкими стенками, сквозь которые свободно протекает клеточная жидкость.

Грибы появились более 300 миллионов лет назад и распространялись через тесную совместную эволюцию с растениями. Фактически все растения, произрастающие на Земле, опираются на помощь крошечных грибков, которые живут в их корнях и обеспечивают поглощение азота. В лесу корни всех деревьев взаимосвязаны через обширную грибковую сеть, которая временами прорывается на поверхность в виде лесных грибов. Без грибов не могли бы существовать первобытные тропические леса.

Через тридцать миллионов лет после появления первых рептилий одна из их родовых ветвей эволюционировала в динозавров (греческий термин, в переводе означающий «ужасные ящерицы»), бесконечное очарование которых, похоже, признают люди всех возрастов. Динозавры отличались огромным разнообразием размеров и форм. Некоторые из них обладали панцирем, закрывавшим тело, и костяными наростами — как современные черепахи или носороги. Одни были травоядными, другие — плотоядными. Подобно другим рептилиям, динозавры откладывали яйца. Многие из них

строили гнезда, а некоторые даже развили крылья и в итоге, около 150 миллионов лет назад, эволюционировали в птиц.

Во времена динозавров распространение рептилий шло полным ходом. Суша и воды были заселены змеями, ящерицами и морскими черепахами, а также морскими змеями и несколькими видами динозавров. Примерно 70 миллионов лет назад динозавры и множество других видов внезапно исчезли, вероятнее всего, в результате падения на Землю огромного метеорита около 7 миль в поперечнике. Катастрофический взрыв вызвал огромное облако пыли, которое на длительный период затмило солнечный свет и привело к критическому изменению погодных паттернов на всей Земле; этих перемен огромные динозавры не смогли пережить.

Забота о молодом поколении

Около 200 миллионов лет назад из рептилий эволюционировали теплокровные позвоночные; они образовали новый класс животных, из которого в конце концов выделились наши предки, приматы. Женские особи этих теплокровных животных уже не заключали зародышей в яйца, а вынашивали их внутри своего тела. После рождения молодь была относительно беспомощной, и матерям приходилось опекать своих детенышей. Поскольку этот класс животных отличался особым поведением, включающим вскармливание молоком из молочных желез, он получил название *млекопитающие*. Примерно 50 миллионов лет спустя другие потомки теплокровных позвоночных, птицы, тоже начали вскармливать и обучать своих беззащитных отпрысков.

Первые млекопитающие были маленькими ночными животными. Тогда как рептилии, неспособные регулировать температуру тела, были инертны в течение холодной ночи, млекопитающие развили в себе способность поддерживать тепло тела на сравнительно постоянном уровне, независимо от окружающих условий. Благодаря этому они и ночью сохраняли внимательность и активность. К тому же они преобразовали часть своих кожных клеток в шерсть, что еще больше выделило их среди других видов и позволило мигрировать из тропиков в более холодные области.

Ранние приматы, известные как *прозимианы* («предмартышки»), эволюционировали в тропиках около 65 миллионов лет назад из насекомоядных млекопитающих, которые обитали на деревьях и напоминали белок. Сегодняшние прозимианы — это маленькие лесные животные, большей частью ночные; они по-прежнему живут на деревьях. Чтобы ночью перепрыгивать с ветки на ветку, эти ранние обитатели деревьев выработали острое зрение, и у некоторых видов глаза постепенно смещались к плоскости лба, что было решающим для освоения трехмерного видения — важнейшее преимущество для оценки расстояния между деревьями. Другие хорошо известные особенности приматов,

связанные с мастерством лазания по деревьям, — цепкие руки и ноги, далеко отстоящий большой палец руки и большие пальцы ног.

В отличие от других животных, прозимианы не были анатомически специализированы и поэтому им постоянно угрожали враги. Тем не менее они компенсировали отсутствие специализации значительным развитием ловкости и интеллекта. Угроза со стороны врагов, постоянная жизнь в бегах и ночная активность побуждали их к сотрудничеству и привели к формированию социального поведения, которое характерно для всех высших приматов. Кроме того, привычка охранять себя, издавая частые пронзительные крики, постепенно развилась в общение посредством голоса.

Большинство приматов — насекомоядные или вегетарианцы, питающиеся орехами, плодами и травами. Временами, когда на деревьях недоставало орехов и плодов, ранним приматам приходилось покидать спасительные ветви и спускаться на землю. Напряженно высматривая врагов поверх высокой травы, они на короткие промежутки времени принимали вертикальную позицию, чтобы потом опять вернуться в согнутое положение; так ведут себя бабуины и по сей день. Способность стоять прямо — пусть и недолго — оказалась важнейшим преимуществом в ходе естественного отбора, поскольку позволяла использовать руки для собирания пищи, держать палку или бросать камни, защищая себя. Со временем их ступни стали более плоскими, ловкость рук повысилась, использование примитивных орудий труда и защиты стимулировало развитие мозга, и, таким образом, некоторые из прозимианов эволюционировали в мартышек и обезьян.

Эволюционная линия мартышек ответвилась от линии прозимианов около 35 миллионов лет назад. *Мартышки* — это дневные животные, как правило отличающиеся от прозимианов более плоскими и выразительными лицами и обычно передвигающиеся на четырех конечностях. Около 20 миллионов лет назад от линии мартышек отделилась линия обезьян, а еще через десять миллионов лет в свои права вступили наши непосредственные предки, человекообразные обезьяны — орангутанги, гориллы и шимпанзе.

Все обезьяны — лесные обитатели, и большинство из них проводят время, по крайней мере частично, на деревьях. Гориллы и шимпанзе, наиболее «приземленные» из всех обезьян, путешествуют на своих четырех, используя *ходьбу на кулаках*, т. е. опираясь на суставы пальцев передних конечностей. Большинство обезьян способны преодолевать небольшие дистанции и на двух ногах. Подобно людям, обезьяны обладают Широкой плоской грудной клеткой и конечностями, приспособленными к широкому пространственному диапазону действий.

Это позволяет им передвигаться по деревьям, попеременно захватывая ветки руками, на что мартишки не способны. Мозг человекообразных обезьян устроен гораздо сложнее, чем у мартишек, и, следовательно, они обладают более высоким интеллектом, чем последние. Для человекообразных обезьян характерна способность использовать и, в ограниченной степени, даже изготавливать орудия труда.

Около четырех миллионов лет назад некий вид шимпанзе в африканских тропиках эволюционировал в вертикально передвигающуюся обезьяну. Этот вид приматов, вымерший миллион лет спустя, был очень похож на других человекообразных, но, благодаря прямой походке, его классифицировали как «гоминида», что, согласно Линн Маргулис, совершенно необоснованно с чисто биологической точки зрения:

Объективные ученые, если бы они были китаи или дельфинами, поместили бы людей, шимпанзе и орангутангов в одну таксономическую группу. Не существует физиологических оснований для выделения человеческих существ в отдельный род... Человеческие существа и шимпанзе имеют гораздо больше общего, чем два произвольно выбранных рода жуков. Несмотря на это, животные с прямой походкой и свободно свисающими руками незаслуженно классифицируются как гоминиды... а не обезьяны⁴⁷.

Приключения человека

Следуя за раскрытием жизни на Земле от самых его начал, мы не можем не испытывать особого волнения, когда подходим к той стадии, на которой первые приматы встают на две ноги, — хотя, вероятно, это волнение научно необоснованно. По мере того как мы узнаем, как рептилии эволюционировали в теплокровных позвоночных, которые заботятся о своем потомстве; как первые приматы развивали плоские ногти, далеко отстоящие большие пальцы и голосовое общение; и как обезьяны развивали «человеческую» грудную клетку и руки, сложный мозг и способность изготавливать орудия труда, — мы можем проследить постепенное возникновение человеческих особенностей. А подойдя к стадии прямоходящих обезьян, освободивших свои руки, мы чувствуем, что здесь по-настоящему начинается эволюционное приключение человека. Чтобы подробно его исследовать, мы должны снова изменить свой временной масштаб — на этот раз с миллионов лет на тысячи.

Прямоходящие обезьяны, которые вымерли около 1,4 миллиона лет назад, принадлежали роду *австралопитеков*. Это название, состоящее из латинского *australis* («южный») и греческого *pithekos* («обезьяна»), означает просто «южная обезьяна». Вид был так назван в честь первого обнаружения в Южной Африке ископаемых останков особи этого вида. Старейшие ископаемые образцы этих южных обезьян известны как

Australopithecus afarensis, по имени области Афар в Эфиопии, где они были найдены. Там же был обнаружен и знаменитый скелет, которому дали имя «Люси». Это были приматы легкого телосложения, вероятно 4,5-футового роста и, предположительно, с интеллектом современного шимпанзе.

После почти миллиона лет генетической устойчивости, примерно три-четыре миллиона лет назад, первые разновидности южной обезьяны эволюционировали в более крепко сложенных существ. Сюда входят две разновидности людей, которые в течение нескольких сотен тысяч лет сосуществовали с южными обезьянами в Африке, пока последние не вымерли.

Важное различие между человеческими существами и другими приматами заключается в том, что детство человеческих отпрысков растягивается на более продолжительный период времени и дети людей, соответственно, достигают половой зрелости и статуса взрослого гораздо позднее, чем любая из обезьян. Если молодь других млекопитающих полностью развивается в утробе и покидает ее уже готовой к жизни во внешнем мире, то наши дети при рождении еще не до конца сформированы и совершенно беспомощны. По сравнению с другими животными кажется, что человеческие детеныши появляются на свет раньше времени.

Это наблюдение представляет основу для общепринятой гипотезы о том, что преждевременные роды у некоторых обезьян сыграли решающую роль, дав толчок человеческой эволюции⁴⁸. Благодаря генетическим изменениям, повлиявшим на временной ход развития особей, незрелорожденные обезьяны могли сохранять свои юношеские особенности дольше, чем другие. Брачные пары таких обезьян, по известному механизму *неотении* («расширение нового»), давали жизнь еще более недоношенным детенышам, которые сохраняли еще больше черт своей юности. Таким путем могло открыться новое эволюционное направление, в конце концов приведшее к появлению почти безволосого вида, взрослые особи которого во многом походили на зародышей обезьян.

Согласно этой гипотезе, беспомощность незрелорожденных детенышей сыграла решающую роль в переходе от обезьян к людям. Новорожденные нуждались в поддержке семьи. Такие семьи формировали сообщества, кочующие племена и поселения, которые заложили основу человеческой цивилизации. Женские особи, как правило, выбирали самцов, которые могли бы позаботиться о них в то время, когда сами они вскармливали и защищали детей. Со временем у самок прекратились сезонные периоды течки, и, поскольку теперь они были сексуально доступны в любое время, самцы, заботящиеся о семье, тоже могли изменить свои сексуальные

привычки, упорядочив собственные половые связи в пользу новых социальных условий¹.

В то же время, свобода рук, которые могли изготавливать орудия труда и защиты и бросать камни, стимулировала продолжающееся развитие мозга, характерное для человеческой эволюции, и, возможно, даже внесла свой вклад в развитие языка. Как пишут об этом Маргулис и Саган:

Способность бросать камни и оглушать или убивать мелкую добычу вывела первобытных людей в новую эволюционную нишу. Мастерство, необходимое для оценки траектории метательного снаряда, поражения цели на расстоянии, сопряжено с увеличением левого полушария мозга. Развитие языковых возможностей (их тоже связывают с левым полушарием...) могло случайно совпасть с увеличением размеров мозга⁴⁹.

Первые человекообразные потомки *южных обезьян* появились в Восточной Африке около 2 миллионов лет назад. Это были небольшие стройные существа с заметно развитым мозгом, который обусловил их способности к изготовлению орудий, намного превышавшие возможности предков-обезьян. Поэтому эти первые человеческие виды называют *Homo habilis* («человек умелый»). Примерно 1,6 миллиона лет назад *Homo habilis* эволюционировал в более сильный и крупный вид, который продолжал совершенствовать свой мозг. Известный как *Homo erectus* («человек выпрямившийся»), этот вид просуществовал более миллиона лет и проявил гораздо большую гибкость, по сравнению со своими предками, приспособляя свои технологии и образ жизни к широкому диапазону окружающих условий. Существуют свидетельства, что эти первобытные люди около 1,4 миллиона лет назад научились добывать и сохранять огонь.

Homo erectus стал первым видом, который покинул уютные африканские тропики и мигрировал в Азию, Индонезию и Европу, укоренившись в Азии около миллиона, а в Европе — около 400 000 лет назад. Вдали от африканской родины первобытным людям пришлось приспособляться к исключительно суровым климатическим условиям, которые в итоге оказали значительное влияние на их дальнейшую эволюцию. Вся эволюционная история человеческого рода, от возникновения *Homo habilis* до революции в земледелии почти два миллиона лет спустя, совпадает со знаменитыми ледниковыми периодами.

В самые холодные эпохи ледяные пласты покрывали обширные области Европы и обеих Америк, а также небольшие площади в Азии. Экстремальные обледенения неоднократно прерывались, и ледники отступали, давая установиться относительно мягкому климату. Вместе с

¹ У всех высших приматов, то есть у всех обезьян, включая таких примитивных, как мармозетки или капучины (не говоря уже об узконосых обезьянах), нет сезонности размножения — то есть в этом отношении они не отличаются от людей. — *Прим. ред.*

тем колоссальные наводнения, вызванные таянием ледяных масс в межледниковые периоды, представляли серьезнейшую угрозу как для животных, так и для людей. Многие виды животных тропического происхождения вымерли, и их сменили более крепкие, покрытые густой шерстью виды — буйволы, мамонты, бизоны и им подобные, — способные противостоять суровым условиям ледниковых периодов.

Первобытные люди охотились на них, используя каменные топоры и дротики, жарили их мясо на кострах, разведенных в пещерах, и использовали шкуры, чтобы защитить себя от жестоких холодов. Охотясь сообща, люди делили и пищу; совместные трапезы стали еще одним катализатором человеческой цивилизации и культуры, породившим и развивавшим с течением времени мифические, духовные и художественные измерения человеческого сознания.

Около 400 000 лет назад *Homo erectus* начал эволюционировать в *Homo sapiens* («человек разумный») — вид, к которому принадлежат современные люди. Эволюция происходила постепенно; появлялись промежуточные виды, которые принято называть архаическими по отношению к *Homo sapiens*. Примерно 250 000 лет назад *Homo erectus* вымер; переход к *Homo sapiens* завершился около 100 000 лет назад в Африке и Азии и примерно 35 000 лет назад — в Европе. Начиная с того времени и до наших дней *Homo sapiens* остается единственным выжившим видом человека.

В тот период, когда *Homo erectus* постепенно эволюционировал в *Homo sapiens*, в Европе ответвилась еще одна линия, которая примерно 125 000 лет назад развилась в классическую неандертальскую форму.

Эволюция человека

Лет назад Стадии эволюции

4 млн. *Australopithecus afarensis*

3,2 млн «Люси» [*Australopithecus afarensis*]

2.5 млн несколько разновидностей *Australopithecus*

2 млн *Homo habilis*

1,6 млн *Homo erectus*

1,4 млн Австралопитеки вымирают

1 млн *Homo erectus* обосновывается в Азии

400 000 *Homo erectus* обосновывается в Европе; начинает формироваться *Homo sapiens*

250 000 архаические формы *Homo sapiens*; *Homo erectus* вымирает

125 000 *Homo neanderthalensis*

100 000 в Африке и Азии окончательно формируется *Homo sapiens*

40 000 в Европе окончательно формируется *Homo sapiens* (кроманьонец)

35 000 неандертальцы вымирают; *Homo sapiens* остается единственной выжившей разновидностью человека

Названный в честь долины Неандер в Германии, где впервые были найдены его останки, этот ярко выраженный вид просуществовал около 90 тысяч лет. Уникальные анатомические черты неандертальцев — они были приземисты и крепки, отличались плотной костью, низко нависающим лбом, тяжелыми челюстями и длинными выступающими вперед зубами — объяснялись, возможно, тем фактом, что они оказались первыми людьми, которые прожили целую эпоху в исключительно холодных условиях, поскольку появились в начале последнего ледникового периода. Неандертальцы закрепились на юге Европы и в Азии, где они оставили следы ритуальных захоронений в пещерах; стены этих пещер украшены разнообразными символами, связанными с культом животных, на которых они охотились. Примерно 35 000 лет назад неандертальцы либо вымерли, либо смешались с формирующимся видом современного человека.

Эволюционные приключения человека — это самая новая фаза в раскрытии жизни на Земле и для нас, естественно, наиболее важная и волнующая. Однако с точки зрения Гайи — всей живой планеты, — эволюция человеческих существ является пока лишь коротким эпизодом, который в ближайшем будущем может быстро закончиться. Чтобы продемонстрировать продолжительность пребывания человеческого рода на этой планете, калифорнийский специалист по окружающей среде Дэвид Брауэр придумал весьма остроумную историю, сжав время существования Земли до шести дней библейского творения⁵⁰.

По сценарию Брауэра, Земля была создана в воскресенье в полночь. Жизнь в форме первых бактериальных клеток появляется во вторник утром, примерно в 8:00. Первые два с половиной дня эволюционирует микрокосм; к четвергу, в полночь, он полностью упрочивается, регулируя всю планетарную систему. В пятницу, примерно в 16:00, микроорганизмы изобретают половое размножение, а в субботу, последний день творения, начинают развиваться все крупные формы жизни.

Около 1:30 в субботу формируются первые морские животные, за ними два часа спустя следуют амфибии и насекомые. Без пяти пять пополудни появляются огромные рептилии, которые бродят по густым тропикам Земли в течение примерно пяти часов, а затем, приблизительно в 21:45, внезапно вымирают. Тем временем к вечеру, около 17:30, на Земле появляются млекопитающие, а немного погодя, примерно в 19:15, — птицы.

Незадолго до 22:00 часть обитающих на деревьях тропических

млекопитающих эволюционирует в первых приматов, а через час некоторые из них эволюционируют в мартишек. Около 23:40 появляются человекообразные обезьяны. За восемь минут до полуночи первые южные обезьяны распрямляются и начинают ходить на двух ногах. Пять минут спустя они исчезают. Первый вид людей, *Homo habilis*, появляется без четырех двенадцать, эволюционирует в *Homo erectus* через полминуты, а в архаические формы *Homo sapiens* — за тридцать секунд до полуночи. Неандертальцы господствуют в Европе и Азии 9 секунд и исчезают за 4 секунды до полуночи. И, наконец, за 11 секунд до полуночи в Африке и Азии и за 5 секунд — в Европе появляются первые современные люди. Вся зафиксированная история человечества длится уже примерно 0,7 секунды.

Примерно 35 000 лет назад современный вид *Homo sapiens* пришел на смену неандертальцам Европы и эволюционировал в подвид, известный как *кроманьонцы* — по названию пещеры на юге Франции, — к которому принадлежат все современные люди. По анатомическим признакам кроманьонцы идентичны нам. Они в полной мере развили язык и произвели настоящую революцию в технологии и художественном творчестве. Тщательно изготовленные орудия из камня и кости, украшения из раковин и слоновой кости и великолепные рисунки на стенах влажных, труднодоступных пещер — яркие свидетельства культурной утонченности этих ранних представителей современной человеческой расы.

До недавнего времени археологи полагали, что кроманьонцы совершенствовали свое пещерное искусство постепенно, от грубых и неуклюжих рисунков до блестящих росписей в Ласко, выполненных около 16 000 лет назад. Однако сенсационная находка, обнаруженная в пещере Шове в декабре 1994 года, заставила ученых радикально пересмотреть свои идеи. Эта огромная пещера в провинции Ардеш на юге Франции представляет собой лабиринт подземных помещений, на стенах которых размещено более 300 великолепно выполненных росписей. Стиль напоминает рисунки в Ласко, однако тщательное радиоуглеродное датирование показало, что росписям в Шове не меньше 30 000 лет⁵¹.

Рисунки, выполненные охрой, углем различных оттенков и красным железняком, представляют символические и мифологические образы львов, мамонтов и других опасных животных; многие из них запечатлены в стремительном беге или прыжке на всю ширину каменных плит пещеры. Специалисты по искусству каменного века были поражены утонченной техникой (тени, динамика фигур, точные углы и др.), которой пользовались пещерные художники для передачи движения и перспективы. Помимо росписей, в пещере находилось множество каменных орудий и ритуальных объектов, в том числе напоминающая алтарь каменная плита, увенчанная черепом медведя. Возможно, самой интригующей находкой оказалось угольное изображение шаманического

существа — наполовину человека, наполовину бизона — в самой дальней и темной части пещеры.

Неожиданно древняя дата этих великолепных росписей означает, что высокое искусство было неотъемлемой частью эволюции современного человечества с самых первых его шагов. Как отмечают Маргулис и Саган:

Одни только эти росписи ясно говорят о присутствии *Homo sapiens* на Земле. Только люди рисуют, только люди придумывают церемониальные походы в отдаленные уголки влажных, темных пещер. Только люди торжественно хоронят своих мертвецов. Поиск исторического предка человека — это поиск сказочника и художника⁵².

Это означает, что верное понимание человеческой эволюции невозможно без понимания эволюции языка, искусства и культуры. Другими словами, сейчас мы должны перенести наше внимание на разум и сознание — третье концептуальное измерение системного взгляда на жизнь.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 10

1. См. Capra(1982), pp. 116ff.
2. Цитируется там же, p. 114.
3. Margulis(1995).
4. См. ниже, с. 247 и далее.
5. См. выше, с. 223— 224.
6. См. Goum(1994).
7. Kauffman(1993), pp. 173, 408, 644.
8. Ранние попытки синтеза некоторых из этих элементов см. в Jantsch(1980) и Laszlo(1987).
9. Lovelock(1991), p. 99.
10. См. Margulis and Sagan(1986), pp. 15ff.
11. См. Capra(1982), pp. 118— 9.
12. См. Margulis and Sagan(1986), p. 75.
13. Там же, p. 16.
14. Там же, p. 89.
15. См. там же.
16. См. там же.
17. Margulis(1995).
18. См. выше, с. 181.
19. Margulis and Sagan(1986), p. 17
20. Там же, p. 15.
21. Margulis and Sagan(1986); см. также Margulis and Sagan(1995) и

Calder(1983).

- 22.Margulis and Sagan(1986), p. 51.
- 23.См. выше, с. 111— 112; а также Kauffman(1993), pp. 287ff.
- 24.См. выше, с. 227.
- 25.Margulis and Sagan(1986), p. 64.
- 26.См. выше, с. 181.
- 27.Margulis and Sagan(1986), p. 78.
- 28.См. Lovelock(1991), pp. 80ff.
- 29.См. Margulis(1993), pp. 160ff.
- 30.См. выше, ее. 183— 185.
- 31.Margulis and Sagan(1986), p. 93.
- 32.Там же, p. 191.
- 33.Там же, p. 103.
- 34.Там же, p. 109.
- 35.См.Lovelock(1991),pp. 113ff.
- 36.См. выше, с. 179 и далее.
- 37.См. выше, с. 250 и далее.
- 38.Margulis and Sagan(1986), p. 119.
- 39.См. выше, с. 183— 184.
- 40.См. Margulis and Sagan(1986), p. 133.
- 41.См. Thomas(1975), pp. 141ff.
- 42.Margulis and Sagan(1986), pp. 155ff.
- 43.См. Margulis, Schwartz, and Dolan(1994).
- 44.Margulis and Sagan(1986), p. 174.
- 45.Там же, p. 73.
- 46.Margulis and Sagan(1995), pp. 140ff.
- 47.Margulis and Sagan(1986), p. 214.
- 48.См. там же, pp. 208ff.
- 49.Там же, p. 210.
- 50.Brower(1995),p. 18.
- 51.См. «*New York Times*», June 8,1995; Chauvet et al. (1995).
- 52.Margulis and Sagan(1986), pp. 223— 224.

Глава 11

Сотворение мира

В контексте зарождающейся теории живых систем разум — не вещь, а процесс. Это познание, процесс обучения, тождественный процессу самой жизни. В этом состоит суть теории познания Сантьяго, предложенной Умберто Матураной и Франциско Варелой.

Идентификация разума, или обучения, с процессом жизни представляет радикально новую идею в науке, но в то же время является одной из самых глубоких и архаичных интуитивных догадок человечества. В древние времена рациональный человеческий рассудок, или разум, рассматривался просто как один из аспектов нематериальной души или духа. Основное различие проводилось не между телом и разумом, но между телом и душой, или телом и духом. Хотя различие между *душой* и *духом* менялось со временем, оба эти термина с самого начала объединяли в себе два понятия — жизненную силу и деятельность сознания².

В древнейших языках обе идеи выражались через метафору дыхания жизни. Действительно, этимологические корни слов «душа» и «дух» во многих языках восходят к «дыханию». Словом, обозначающим «душу» на санскрите (*атман*), греческом (*пневма*) и латинском (*анима*), служит «дыхание». То же относится и к «духу». На латинском (*спиритус*), греческом (*психе*) и древнееврейском (*руах*) это тоже — «дыхание».

Всеобщее древнее интуитивное представление, стоящее за этими словами, связывало душу или дух с дыханием жизни. Подобным же образом, концепция познания в теории Сантьяго далеко не ограничивается рациональным разумом, но включает весь процесс жизни. *Дыхание жизни* — исключительно точная метафора для его описания.

Когнитивная наука

Подобно концепции «ментального процесса», независимо сформулированной Грегори Бэйтсоном³, теория Сантьяго уходит корнями в кибернетику. Она была разработана в рамках интеллектуального движения, которое подходит к изучению разума и познания с системной, междисциплинарной точки зрения, лежащей за пределами традиционной сферы психологии и эпистемологии. Этот новый подход, который еще не выкристаллизовался в зрелую научную дисциплину, все чаще называют *когнитивной наукой*⁴.

Кибернетика дала когнитивной науке первую модель обучения. Она исходила из того, что человеческий интеллект подобен компьютерному до такой степени, что познание можно определить как обработку информации, т. е. манипуляцию символами, основанную на наборе правил⁵. Согласно этой модели, процесс познания включает в себя *ментальное представление*. Разум здесь осмысливается как компьютер,

манипулирующий символами, которые представляют определенные черты мира⁶. Эта компьютерная модель ментальной деятельности была настолько убедительной и мощной, что господствовала во всех исследованиях когнитивной науки на протяжении более чем тридцати лет.

Начиная с 40-х годов вся нейробиология формировалась под воздействием идеи, представляющей мозг в виде устройства для обработки информации. Например, когда исследования зрительной области коры мозга показали, что определенные нейроны реагируют на определенные особенности воспринимаемых объектов — скорость, цвет, контраст и т. д., — сразу возникло представление о том, что эти специализированные нейроны считывают зрительную информацию с сетчатки и передают ее в другие области мозга для дальнейшей обработки. Однако последующие исследования на животных показали, что связывать нейроны с соответствующими характеристиками объектов можно только тогда, когда животное находится под глубоким наркозом и осуществляется строгий контроль над внутренней и внешней средой. Когда животное наблюдают в бодрствующем состоянии и в более привычных для него внешних условиях, его нейронные реакции оказываются более чувствительными ко всему контексту визуального возбудителя и уже не могут быть истолкованы в терминах последовательной обработки информации⁷.

В 70-е годы, когда появилась концепция *самоорганизации*, компьютерная модель обучения была наконец подвергнута серьезному сомнению. Необходимость свежего критического взгляда на эту доминирующую гипотезу была обусловлена двумя хорошо известными недостатками компьютерного «видения». Первый: обработка информации основана на ряде последовательных правил, применяемых по очереди; | второй: эта обработка локализована таким образом, что повреждение [любой части системы приводит к серьезным нарушениям ее работы в | целом. Обе эти особенности входят в поразительное противоречие с биологическими наблюдениями. Самые обычные визуальные задачи даже крохотными насекомыми решаются быстрее, чем это физически возможно при последовательной обработке; а способность поврежденного мозга к восстановлению и сохранению функционирования в целом хорошо известна всем.

Эти наблюдения побуждали к сдвигу фокуса — от символов к связности, от локальных правил к глобальной согласованности, от обычной обработки информации к неожиданным возможностям нейронных сетей. С учетом современного развития нелинейной математики и моделей самоорганизующихся систем, такое смещение внимания обещало новые и интеллектуально волнующие направления исследований. Действительно, в начале 80-х годов модели «связных» нейронных сетей приобрели большую популярность⁸. Эти модели тесно

взаимосвязанных элементов предназначены для одновременного выполнения миллионов операций и проявляют интересные глобальные — *внезапно возникающие* — свойства. Как поясняет Франциско Варела, «Мозг — это... высоко согласованная система: плотные взаимодействия между его компонентами приводят к тому, что в конечном счете все, что происходит, оказывается функцией того, что делают все компоненты... В результате вся система приобретает внутреннюю согласованность в своих паттернах, хотя мы не можем точно сказать, как это происходит»⁹.

Теория Сантьяго

Теория Сантьяго, трактующая познание, возникла в ходе изучения нейронных сетей и с самого начала была связана с концепцией автопознания, предложенной Матураной¹⁰. Познание, или обучение, согласно Матуране, представляет собой деятельность, являющуюся составной частью самосозидания и самоподдержания автопознательных сетей. Другими словами, обучение — это сам процесс жизни. «Живые системы — это когнитивные системы, — пишет Матурана, — а жизнь — это процесс обучения»¹¹. Обращаясь к нашим трем критериям живых систем — структуре, паттерну и процессу, — мы можем сказать, что жизненный процесс состоит из всех видов деятельности, направленной на непрерывное воплощение системного (автопознательного) паттерна организации в физической (диссипативной) структуре.

Поскольку познание традиционно понимается как процесс получения знания, мы должны описать его как взаимодействие организма с окружающей средой. Именно это и делает теория Сантьяго. Специфическим феноменом, лежащим в основе процесса познания, является структурное сопряжение. Как мы видели, автопознательная система претерпевает непрерывные структурные изменения, сохраняя в то же время свой паутинообразный паттерн организации. Она сопряжена со своим окружением *структурно*, т. е. через повторяющиеся взаимодействия, каждое из которых является толчком для структурных изменений в системе¹². Тем не менее живая система вполне автономна. Окружение лишь инициирует структурные изменения; оно не определяет и не направляет их.

Далее, живая система не просто определяет структурные изменения; она определяет также, *какие именно внешние возмущения инициируют их*. В этом ключ к пониманию теории Сантьяго. Структурные изменения в системе — это и есть акты познания. Определяя, какие из возмущений, поступающих от внешней среды, становятся начальными толчками перемен, система, как говорят Матурана и Варела, «творит некий мир». В таком *случае*, познание — это не представление независимо существующего мира, но скорее непрерывное *творение мира* в процессе

жизнедеятельности. Взаимодействие живой системы с окружающей ее средой имеет познавательный характер, и сам процесс жизнедеятельности есть процесс познания. По словам Матураны и Варелы, «жить значит знать»¹³.

Очевидно, что здесь мы имеем дело с радикальным расширением концепции познания и, следовательно, концепции разума. Согласно этому новому подходу, познание охватывает весь процесс жизни — включая восприятие, эмоции и поведение — и не обязательно нуждается в мозге и нервной системе. Даже бактерии воспринимают определенные характеристики своего окружения. Они ощущают химические различия и, соответственно, плывут в сторону сахара и сторонятся кислоты; они ощущают перегрев и избегают его, они движутся к свету или удаляются от него, а некоторые бактерии способны обнаруживать магнитные поля¹⁴. Таким образом, даже бактерия творит мир — мир тепла и холода, магнитных полей и химических градиентов. Во всех этих когнитивных процессах восприятие и действие неразделимы, и, поскольку структурные изменения и связанные с ними действия, которые инициируются в организме, зависят от структуры организма, Франциско Варела описывает познание как «воплощенное действие»¹⁵.

Фактически познание включает в себя два неразрывно связанных вида деятельности: поддержание (и продолжение) автопоэза и созидание мира. Живая система — это многократно взаимосвязанная сеть, чьи компоненты постоянно изменяются, преобразуются и заменяются другими компонентами. Эта сеть отличается исключительной гибкостью и текучестью, что позволяет системе особым образом реагировать на возмущения, или «стимулы», идущие от окружающей среды. Определенные возмущения запускают специфические структурные изменения, т. е. изменения в структуре связи внутри сети. Это распределительный феномен: вся сеть реагирует на выбранное возмущение, перестраивая свои паттерны связи.

Разные организмы изменяются по-разному, и со временем каждый организм в процессе развития формирует свое индивидуальное направление структурных изменений. Поскольку эти структурные изменения являются актами познания, развитие всегда ассоциируется с познанием. Фактически развитие и обучение — две стороны одной медали. Оба они суть проявления структурного сопряжения.

Не все физические изменения в организме являются актами познания. Когда кролик съедает часть одуванчика или когда зверь получает ранение, эти структурные изменения не определяются и не направляются организмом; они не связаны с выбором и, следовательно, не являются актами познания. Тем не менее эти вынужденные физические изменения

сопровождаются другими структурными изменениями (восприятие, реакция иммунной системы и т. д.), которые оказываются актами познания.

С другой стороны, не все возмущения, исходящие из окружающей среды, вызывают структурные изменения. Живые организмы реагируют лишь на малую часть возбудителей, воздействующих на них. Общеизвестно, что нам доступны звуки лишь ограниченного диапазона частот; мы часто не замечаем вещи и события в нашем окружении, которые нас не касаются; известно также, что наше восприятие в значительной мере обусловлено рамками наших представлений и культурным контекстом.

Другими словами, существует множество возмущений, не вызывающих структурных изменений, поскольку они «чужды» системе. Таким образом, каждая живая система строит свой характерный мир согласно своей характерной структуре. Как отмечает Варела, «разум и мир переживают совместное становление»¹⁶. Однако через обоюдное структурное сопряжение, отдельные живые системы составляют части миров друг друга. Они общаются между собой и координируют свое поведение¹⁷. Это — *экология миров*, взращенная взаимно согласованными актами познания.

По теории Сантьяго, познание является неотъемлемой частью взаимодействия живого организма с его окружением. Организм не *реагирует* на раздражающие факторы окружения через линейную причинно-следственную цепочку, но *отвечает* структурными изменениями в своей нелинейной организационно закрытой автопоэзной сети. Такой тип ответа дает организму возможность поддерживать свою автопоэзную организацию и, следовательно, продолжать свое существование в окружающей среде. Другими словами, когнитивное взаимодействие со своей средой — это взаимодействие *разумное*. С точки зрения теории Сантьяго, разумность есть проявление богатства и гибкости способов структурного сопряжения организма.

Диапазон тех взаимодействий с окружающей средой, которые может осуществлять живая система, определяет ее *когнитивную сферу*. Эмоции являются естественной частью этой сферы. Например, когда мы отвечаем на оскорбление вспышкой гнева, весь этот паттерн физиологических процессов — пылающее лицо, учащенное дыхание, дрожь и т. п. — является частью познания. И новейшие исследования убедительно подтверждают, что каждый когнитивный акт эмоционально окрашен¹⁸.

По мере того как возрастает сложность живого организма, расширяется и его когнитивная сфера. В частности, мозг и нервная система значительно расширяют когнитивную сферу организма, поскольку они значительно увеличивают диапазон и развивают дифференциацию структурных

сопряжений. На определенном уровне сложности живой организм структурно сопрягается не только с окружающей средой, но и с самим собой, творя тем самым не только внешний, но и внутренний мир. У человеческих существ созидание внутреннего мира тесно связано с языком, мыслью и сознанием¹⁹.

Не отображение, не информация

Являясь частью единой концепции жизни, разума и сознания, когнитивная теория Сантьяго имеет глубокое значение для биологии, психологии и философии. В частности, что касается ее вклада в эпистемологию — раздел философии, изучающий природу знания о мире, — то это, вероятно, один из самых радикальных и спорных ее аспектов.

Уникальная особенность эпистемологии, заложенной в теорию Сантьяго, состоит в том, что она противоречит идее, присущей большинству эпистемологии, но редко выражаемой явным образом, — идее о том, что познание есть отображение, *представление* независимого существующего мира. Компьютерная модель познания как обработки информации была просто своеобразной формулировкой (основанной на ошибочной аналогии) более общей идеи о том, что мир предопределен и независим от наблюдателя, а познание есть ментальное отображение объективных особенностей этого мира внутри познающей системы. Центральным образом здесь является, согласно Вареле, «познающий агент, заброшенный на парашюте в предопределенный мир» и выделяющий его существенные черты через процесс отображения²⁰.

Согласно теории Сантьяго, познание есть не отображение независимого, предопределенного мира, но сотворение нового мира. Конкретным организмом в процессе его жизнедеятельности создается не мир *вообще*, а некий *конкретный* мир, всегда обусловленный структурой организма. Поскольку индивидуальные организмы в рамках одного вида обладают более или менее идентичной структурой, они создают схожие миры. Мы, люди, кроме этого, сообща пользуемся абстрактным миром языка и мысли и благодаря этому сообща творим наш действительный мир²¹.

Матурана и Варела не считают, что где-то существует некая пустота, из которой мы создаем вещество. Есть материальный мир, но он не обладает никакими предопределенными свойствами. Авторы теории Сантьяго не утверждают, что «ничто не существует»; они утверждают, что «ни одна вещь не существует» независимо от процесса познания. Нет объективно существующих структур; нет заданной территории, карту которой мы могли бы составить: само составление карты порождает особенности территории.

Нам известно, например, что кошки или птицы видят деревья

совершенно иначе, чем мы, потому что воспринимают свет в другом частотном диапазоне. Таким образом, форма и фактура «деревьев», которые они творят, будут отличаться от наших. Глядя на дерево, мы не изобретаем реальность. Но способы, посредством которых мы устанавливаем форму и размеры объектов и выделяем паттерны из множества получаемых нами сенсорных воздействий, зависят от нашего физического устройства. Как сказали бы Матурана и Варела, способы, которые мы используем для структурного сопряжения с окружающей средой, и, следовательно, мир, который мы творим, зависят от нашей собственной структуры.

Вместе с идеей о ментальном представлении независимого мира теория Сантьяго отвергает и идею об информации как некоторой совокупности объективных черт этого независимо существующего мира. По словам Варелы:

Мы должны подвергнуть сомнению нашу уверенность в том, что мир предопределен и что познание — это отображение. В контексте когнитивной науки это означает, что мы должны пересмотреть идею о том, что в мире существует готовая информация и ее извлекает познающая система²².

Отказ от отображения и информации как основных компонентов процесса познания дается с трудом, поскольку мы привыкли постоянно пользоваться обоими этими понятиями. Символы нашего языка, как разговорного, так и письменного, суть отображения вещей и идей; и в нашей обыденной жизни мы рассматриваем факты (время, даты, сводки погоды, телефон друга) как весьма важные для нас элементы информации. Фактически всю нашу эпоху часто называют «веком информации». Как же, в таком случае, Матурана и Варела могут утверждать, что в процессе познания нет информации?

Чтобы понять это на первый взгляд озадачивающее утверждение, мы должны помнить, что у человеческих существ познание включает язык, абстрактное мышление и символические понятия — феномены, другим биологическим видам недоступные. Способность абстрактно мыслить, как мы увидим далее, является ключевой характеристикой человеческого сознания, и, благодаря этой способности, мы действительно можем использовать, и используем, ментальное отображение, символы и информацию. Однако эти элементы процесса познания присущи не всем живым системам. И хотя человек часто использует ментальное отображение и информацию, наш познавательный процесс построен не на них.

Для того чтобы правильно оценить эти идеи, нам очень полезно будет более пристально рассмотреть то, что подразумевается под

«информацией». Обыденное представление сводится обычно к тому, что информация — это «нечто, находящееся где-то», а мозг собирает и обрабатывает это нечто. Однако таким элементом информации является число, имя или краткое сообщение, которое мы извлекаем из всей сети взаимоотношений, из контекста, в который оно заключено и который сообщает ему смысл. Всякий раз, когда такой «факт» заключен в устойчивом контексте и встречается нам с высокой регулярностью, мы можем абстрагировать его от контекста, поставить его в соответствие со значением, присущим ему внутри этого контекста, и назвать это «информацией». Мы настолько привыкли к таким абстрактным операциям, что склонны верить, что значение содержится в элементе информации, а не в контексте, из которого он был извлечен.

Например, в красном цвете нет ничего «информативного», за исключением того, что, будучи включенным в культурную сеть соглашений и технологическую сеть дорожного движения, он ассоциируется с остановкой на перекрестке. Если бы люди из какой-то иной культуры приехали в один из наших городов и увидели красный свет светофора, он, скорее всего, не имел бы для них никакого смысла. Передачи информации не произошло бы. Подобным же образом время дня и дата абстрагируются нами от сложных понятий и идей, связанных с солнечной системой, астрономическими наблюдениями и культурными условностями.

Эти соображения применимы и к генетической информации, закодированной в ДНК. Варела поясняет, что понятие генетического кода было абстрагировано от лежащей в его основе метаболической сети, в которой только и имеет смысл этот код:

Долгие годы биологи рассматривали протеиновые последовательности как инструкции, закодированные в ДНК. Очевидно, однако, что триплеты ДНК могут заранее определять содержание аминокислот в протеине только в том случае, если они включены в клеточный метаболизм, то есть в тысячи ферментных «правил» в сложной химической сети. И только благодаря возникновению внезапных регулярностей в такой сети в целом, мы можем вынести за скобки этот метаболический фон и тогда уже рассматривать триплеты как коды для аминокислот²³.

Матурана и Бэйтсон

Отказ Матураны от идеи о том, что познание включает ментальное отображение независимого мира, служит ключевым различием между его концепцией процесса познания и теорией Грегори Бэйтсона. Матурана и Бэйтсон, практически одновременно и независимо друг от друга, пришли к революционной идее отождествления процесса познания с процессом

жизни²⁴. Но они подошли к ней с совершенно разных сторон: Бэйтсон основывался на своем глубоком интуитивном понимании природы разума и жизни, подкрепленном тщательными наблюдениями над живым миром; Матурану вели его попытки определить — на основе нейробиологических исследований — паттерн организации, присущий всем живым системам.

Бэйтсон, работая в одиночку, годами оттачивал свои «критерии ментального процесса», но так и не развил их в теорию живых систем. Матурана, в противоположность ему, сотрудничал с другими учеными в разработке теории *организации живого*, которая обеспечила теоретическую основу для понимания процесса познания как процесса жизни. Как отмечает в своей обширной статье «*Понять Бэйтсона и Матурану*» исследователь социальной сферы Пол Делл, Бэйтсон сосредоточился исключительно на эпистемологии (природе знания) в ущерб онтологии (природе бытия):

Для Бэйтсона онтология остается «нехоженой дорогой»... У эпистемологии Бейтсона нет онтологии, которая могла бы стать ее основанием... Я убежден, что труды Матураны содержат как раз ту онтологию, которую Бэйтсон так и не разработал²⁵.

Изучение бэйтсоновских критериев ментального процесса показывает, что они распространяются как на структуру, так и на паттерны живых систем; возможно, из-за этого многие ученики Бэйтсона находили их достаточно сложными для понимания. Внимательный анализ этих критериев выявляет также заложенное в их основу верование, что познание сводится к ментальному отображению объективных характеристик мира в познающей системе²⁶.

Бэйтсон и Матурана, независимо друг от друга, разработали революционную концепцию разума, основанную на кибернетике. Бэйтсон способствовал развитию этой традиции еще в 40-е годы. Возможно, именно его увлечение кибернетическими идеями в период их становления привело к тому, что Бэйтсону так и не удалось выйти за пределы компьютерной модели познания. Матурана же, в отличие от него, отказался от этой модели и разработал теорию, в которой познание рассматривается как акт «сотворения мира», а сознание — как феномен, тесно связанный с языком и абстрактным мышлением.

Пересмотр компьютерной модели

На предыдущих страницах я неоднократно подчеркивал различия между теорией Сантьяго и компьютерной моделью познания, разработанной в рамках кибернетики. Теперь было бы полезно еще раз взглянуть на компьютеры в свете нашего нового понимания познания, чтобы развеять дымку недоразумений, окутывающую «компьютерный интеллект».

Компьютер обрабатывает информацию. Это означает, что он манипулирует символами на основе определенных правил. Символы представляют собой определенные элементы, загружаемые в компьютер извне; в ходе обработки информации изменений в структуре машины не происходит. Физическая структура компьютера неизменна, она определена замыслом разработчика и конструкцией.

Нервная система живого организма функционирует существенно иначе. Как мы видели, она взаимодействует со своим окружением, постоянно изменяя свою структуру таким образом, что в каждый определенный момент ее физическая структура является записью предыдущих структурных изменений. Нервная система не обрабатывает информацию из внешнего мира, но, наоборот, *творит некий мир* в процессе познания.

В человеческом познании используется язык и абстрактное мышление и, следовательно, символы и ментальные отображения; но абстрактная мысль — это лишь малая часть человеческого познания, и, вообще говоря, она не служит основой для наших повседневных решений и действий. Человеческие решения никогда не бывают в полной мере рациональными, зато всегда окрашены эмоциями; человеческая мысль всегда погружена в телесные ощущения и процессы, которые вносят свой вклад в полный спектр познания.

В книге «Компьютеры и познание» исследователи компьютеров Терри Уиноград и Фернандо Флорес подчеркивают, что рациональная мысль отфильтровывает и отбрасывает подавляющую часть когнитивного спектра и тем самым вызывает «слепоту абстракции». Подобно шорам, термины, принятые нами для самовыражения, ограничивают диапазон нашего взгляда на мир. В компьютерной программе, как поясняют Уиноград и Флорес, различные цели и задачи формулируются в терминах ограниченного набора объектов, свойств и операций; этот набор и воплощает ту слепоту, которая приходит вместе с абстракциями, необходимыми для создания программ. Однако:

Существуют ограниченные типы задач, в которых эта слепота не исключает достаточно разумного поведения. Например, многие игры предполагают прямое применение... таких программ, которые позволяют переигрывать соперника-человека... Это те области, в которых идентификация требуемых характеристик весьма прямолинейна, а природа решений имеет четкий и ясный характер²⁷.

Большая путаница вызвана тем, что компьютерщики используют слова «интеллект», «память» и «язык» для описания компьютеров, тем самым как бы уравнивая эти понятия с человеческими феноменами, хорошо известными из повседневного опыта. Это серьезная ошибка. Например, самая суть разума заключается в том, чтобы действовать наилучшим

образом в условиях неопределенной проблемы и неочевидных решений. Разумное человеческое поведение в таких ситуациях основано на здравом смысле, накопленном из жизненного опыта. Здравый смысл, однако, недоступен компьютерам из-за слепоты абстракции и неизбежной ограниченности формальных операций; поэтому и невозможно запрограммировать компьютер на разумность²⁸.

Одновременно с идеей искусственного интеллекта появился и великий соблазн запрограммировать компьютер на понимание человеческого языка. Однако после нескольких десятилетий тщетной работы над этой проблемой изобретатели АИ (автоматического интерпретатора) начинают понимать, что все их усилия обречены на неудачу: компьютерам не дано в более или менее достаточной степени понять человеческий язык²⁹. Причина в том, что язык вложен в паутину социальных и культурных условностей, которая содержит и негласный контекст смысла. Мы понимаем этот контекст, потому что он эквивалентен нашему здравому смыслу, но компьютер нельзя запрограммировать на здравый смысл и, следовательно, на понимание языка.

Это положение может быть проиллюстрировано множеством простых примеров, вроде текста, приведенного Терри Уиноградом: «Томми только что подарили новый набор кубиков. Он как раз открывал коробку, когда вошел Джимми». Как поясняет Уиноград, компьютер ни за что не догадается, что лежит в коробке, мы же сразу предполагаем, что в ней лежат новые кубики Томми. Мы-то знаем, что подарки обычно приносят в коробках и что самое естественное в этом случае — открыть коробку. И, что еще более важно, мы полагаем, что два предложения в тексте взаимосвязаны, тогда как компьютер не видит смысла в том, чтобы связывать коробку с кубиками. Другими словами, наша интерпретация этого простого текста основана на некоторых связанных со здравым смыслом предположениях и ожиданиях, недоступных компьютеру³⁰.

Тот факт, что компьютер не может понять язык, отнюдь не означает, что он не может быть запрограммирован на распознавание простых лингвистических структур и манипуляции с ними. Действительно, в последние годы в этой области был достигнут значительный прогресс. Сегодня компьютер может распознавать несколько сотен слов и фраз, и этот базовый словарь продолжает расширяться. Так, машины все чаще используются для взаимодействия с людьми посредством структур человеческого языка и выполнения ограниченного круга заданий. Например, я могу позвонить в свой банк и запросить информацию о моем текущем счете; компьютер, если он получит также особый кодовый сигнал, сообщит мне состояние баланса, номера и суммы последних выплат и вкладов и т. п. Такое взаимодействие, предполагающее комбинацию простых произнесенных слов с набранным кодовым номером,

очень удобно и полезно; но из этого вовсе не следует, что банковский компьютер понимает человеческий язык.

К сожалению, налицо поразительный диссонанс между критическими оценками АИ и радужными проектами компьютерной индустрии (последние явно мотивированы коммерческими интересами). Новейшая волна самых восторженных обещаний исходит от так называемого «проекта пятого поколения», запущенного в Японии. Анализ его грандиозных планов показывает, тем не менее, что они не более реальны, чем аналогичные предыдущие проекты, хотя вполне вероятно, что в рамках программы будет создано немало полезных побочных продуктов³¹.

Центральной идеей проекта пятого поколения и других подобных исследовательских программ служит разработка так называемых «экспертных систем», ориентированных на то, чтобы соперничать с экспертами-людьми в решении определенных задач. Здесь мы опять сталкиваемся с неудачным использованием терминологии. Как отмечают Уиноград и Флорес:

Называть программу «экспертом» — значит вводить в заблуждение точно так же, как и называть ее «разумной» или говорить, что она «понимает». Такое неадекватное представление может быть полезным для тех, кто пытается обеспечить финансирование своих исследований или продавать подобные программы, но оно может вызвать необоснованные ожидания у тех, кто пытается их использовать³².

В середине 80-х философ Хьюберт Дрейфус и исследователь компьютеров Стюарт Дрейфус предприняли тщательное исследование экспертизы, проводимой людьми, и сопоставили ее с компьютерными экспертными системами. Вот что они обнаружили:

...следует расстаться с традиционным убеждением, что новичок учится на частных случаях и лишь по мере приобретения профессионального мастерства начинает абстрагировать и усваивать все более тонкие законы... Приобретение мастерства происходит как раз в противоположном направлении — от абстрактных законов к особым случаям. Похоже, что новичок делает умозаключения, используя законы и факты точно так же, как и эвристически запрограммированный компьютер, однако при наличии таланта и с приобретением соответствующего опыта новичок превращается в эксперта, который интуитивно видит, что нужно делать, не пользуясь законами³³.

Это замечание показывает, почему экспертные системы никогда не достигают уровня экспертов-людей: последние действуют не по жесткой системе правил, а на основе интуитивного восприятия всей совокупности

фактов. Дрейфус и Дрейфус отмечают также, что экспертные системы практически проектируются на основе опроса экспертов-людей, владеющих знанием соответствующих правил. Когда это делается, эксперты чаще всего формулируют те законы, которые запомнили со времен ученичества, но перестали использовать, став профессиональными экспертами. Если эти законы ввести в компьютер, результирующая экспертная система будет копировать новичка, но никогда не сможет соперничать с настоящим экспертом.

Когнитивная иммунология

Вероятно, наиболее важные практические применения теория Сантьяго нашла в нейробиологии и иммунологии. Как уже отмечалось, новый взгляд на познание существенно проясняет загадку вековой давности о взаимосвязи между разумом и мозгом. Разум представляет собой не вещь, а процесс — процесс познания, тождественный процессу жизни. Познание является специфической структурой, с помощью которой этот процесс осуществляется. Таким образом, взаимосвязь между разумом и мозгом — это взаимосвязь между процессом и структурой.

Мозг никоим образом не является единственной структурой, вовлеченной в процесс познания. Становится все более очевидным, что иммунная система человека, равно как и других позвоночных, представляет собой сеть не менее сложную и переплетенную, чем нервная система, и выполняет не менее важные координирующие функции. Классическая иммунология рассматривает иммунную систему как защитную систему тела, направленную вовне; ее часто описывают с помощью военных метафор — армии белых кровяных клеток, генералов, солдат и т. д. Последние открытия Франциско Варелы и его коллег из Парижского университета бросают серьезный вызов этой концепции³⁴. Сегодня многие исследователи убеждены, что классический подход с его военными метафорами был одним из главных камней преткновения на пути к разгадке аутоиммунных заболеваний, таких, как СПИД.

В отличие от нервной системы, сосредоточенной и связанной через анатомические структуры, иммунная система рассеяна в лимфатической жидкости, проникающей в каждую отдельную ткань. Ее компоненты — класс клеток, именуемых лимфоцитами и широко известных как белые кровяные клетки, — очень быстро передвигаются и вступают в химические связи друг с другом. Лимфоциты представляют собой группу на редкость разнообразных клеток. Каждый их тип отличается особыми молекулярными маркерами — *антителами*, которые выступают над поверхностью этих клеток. Человеческое тело содержит миллиарды белых кровяных клеток различного типа, которые обладают чрезвычайной способностью химически связывать любой молекулярный профиль в

окружающей их среде.

Согласно традиционной иммунологии, лимфоциты обнаруживают вторгшийся агент, антитела прикрепляются к нему и таким образом его нейтрализуют. Такая последовательность означает, что белые кровяные клетки распознают чужие молекулярные профили. Более детальные исследования показывают, что этот процесс предполагает также некоторую форму обучения и запоминания. В классической иммунологии, однако, такие представления используют чисто метафорически, не связывая их с каким-либо реальным когнитивным процессом.

Недавние исследования показали, что в нормальных условиях антитела, циркулирующие во всем теле, прикрепляются ко многим (если не ко всем) типам клеток, включая и самих себя. Вся система скорее напоминает сеть, множество людей, разговаривающих между собой, но не воинов, высматривающих врага. Постепенно иммунологи были вынуждены изменить свое представление, смещаясь от иммунной *системы* к иммунной *сети*.

Этот сдвиг представлений оказался серьезной проблемой для классической школы. Если иммунная система — это сеть, компоненты которой связываются друг с другом, и если антитела призваны уничтожать то, с чем они связываются, то выходит, что мы должны разрушать сами себя. Очевидно, что мы этого не делаем. Похоже, что иммунная система все-таки способна отличать клетки собственного тела от чуждых агентов, себя от несебя. Но поскольку, по классической теории, распознать чуждый агент для антитела означает химически прикрепиться к нему и тем самым нейтрализовать его, то остается загадкой, каким образом иммунная система может распознавать собственные клетки, не нейтрализуя их, т. е. не разрушая их функционально.

Более того, с традиционной точки зрения, иммунная система может развиваться только тогда, когда происходят внешние возмущения, на которые она реагирует. Если нет атак, антитела не развиваются. Последние эксперименты показали, однако, что животные, полностью защищенные от болезнетворных агентов, все же развивают полноценную иммунную систему. С новой точки зрения, это вполне естественно, поскольку основная задача иммунной системы состоит не в том, чтобы реагировать на внешние угрозы, а в том, чтобы обеспечивать собственную устойчивость³⁵.

Варела и его коллеги считают, что иммунную систему следует понимать как автономную когнитивную сеть, которая отвечает за «молекулярную идентичность» тела. Взаимодействуя друг с другом и с другими клетками тела, лимфоциты непрерывно регулируют количество клеток и их молекулярные профили. Иммунная система не просто

реагирует на чуждые агенты, но обслуживает важную функцию регулирования клеточного и молекулярного репертуара организма. Как поясняют Франциско Варела и иммунолог Антонио Кутиньо: «Тесный союз иммунной системы и тела позволяет телу поддерживать гибкую и пластичную идентичность на протяжении всей его жизни и реагировать на многочисленные внешние возмущения»³⁶.

Согласно теории Сантьяго, когнитивная деятельность иммунной системы обусловлена ее структурным сопряжением с окружающей средой. Когда чуждые молекулы проникают в тело, они вызывают возмущения в иммунной сети, запуская структурные изменения. Результирующая реакция состоит не в автоматическом разрушении чуждых молекул, но в регулировании их уровня в контексте других регулирующих механизмов системы. Реакция может быть различной: она зависит от состояния всей системы.

Когда иммунологи вводят в организм большие объемы чуждого агента, как это делается в стандартных экспериментах над животными, иммунная система дает массированный защитный ответ, описанный в классической теории. Однако, замечают Варела и Кутиньо, это в высшей степени искусственная лабораторная ситуация. В своей естественной окружающей среде животное не получает больших порций вредоносных веществ. Малые количества, которые действительно проникают в тело, естественным образом включаются в текущую регуляторную деятельность иммунной сети.

С пониманием иммунной системы как когнитивной, самоорганизующейся и саморегулирующей сети тайна различения «свой—чужой» легко раскрывается. Иммунная система не делит клетки на свои и чужие (такое разделение ей и не требуется), поскольку и те и другие являются объектами регулирующих процессов. Тем не менее, если вторжение чуждых агентов оказывается настолько массированным, что они не могут быть включены в регулирующую сеть, как, например, в случае инфекции, они приводят в действие специфические механизмы иммунной системы, которые формируют защитную реакцию.

Исследования показали, что широко известный иммунный ответ такого рода включает квазиавтоматические механизмы, практически независимые от когнитивной деятельности сети³⁷. По традиции, иммунология имела дело исключительно с такой «рефлекторной» иммунной деятельностью. Ограничиться этими исследованиями все равно, как если бы мы ограничили исследование мозга изучением рефлексов. Защитная иммунная деятельность очень важна, но в свете новых воззрений она являет собой лишь второстепенную функцию когнитивной деятельности иммунной системы, сосредоточенной преимущественно на внутренних процессах и

поддерживающей молекулярную идентичность тела.

Область когнитивной иммунологии пока еще переживает период становления, и самоорганизующие свойства иммунных сетей поняты далеко не до конца. Тем не менее некоторые ученые, проявляющие активность в этой новой сфере исследований, уже стали задумываться над многообещающими клиническими применениями в области лечения аутоиммунных заболеваний³⁸. Вероятно, терапевтические стратегии будущего будут основаны на понимании того, что аутоиммунные заболевания отражают нарушения в функционировании иммунной сети. Эти стратегии, возможно, будут опираться на новые технологии, призванные укрепить сеть, восстанавливая ее связность.

Такие технологии, однако, потребуют гораздо более глубокого понимания богатой динамики иммунных сетей, прежде чем их можно будет эффективно применять. В будущем открытия когнитивной иммунологии обещают стать исключительно важными для всей сферы здравоохранения и медицины. По мнению Варелы, утонченный психосоматический взгляд на здоровье («разум-тело») не сможет развиваться, пока мы не привыкнем понимать нервную и иммунную системы как две взаимодействующие когнитивные системы, как два «мозга» в непрерывном диалоге³⁹.

Психосоматическая сеть

Важный недостающий фрагмент картины был найден в середине 80-х нейробиологом Кэндейс Перт и ее коллегами из Национального института душевного здоровья в Мэриленде. Эти исследователи идентифицировали группу молекул, называемых пептидами, в роли молекулярных посланников, обеспечивающих диалог между нервной и иммунной системами. Фактически Перт и ее коллеги обнаружили, что эти посланники связывают три автономные системы — нервную, иммунную и эндокринную — в единую сеть.

Согласно традиционному взгляду, это три отдельные системы и выполняют они разные функции. Нервная система, состоящая из мозга и сети нервных клеток, пронизывающей все тело, представляет собой вместилище памяти, мыслей и эмоций. Эндокринная система, состоящая из желез и гормонов, является основной регулирующей системой тела, контролируя и интегрируя разнообразные телесные функции. Иммунная система, состоящая из селезенки, костного мозга, лимфатических узлов и иммунных клеток, циркулирующих по телу, служит защитной системой тела, отвечающей за цельность ткани и контролирующей заживление ран и механизмы восстановления тканей.

Соответственно, эти три системы изучаются тремя отдельными дисциплинами — нейробиологией, эндокринологией и иммунологией.

Между тем, новые исследования пептидов убедительно показали, что это концептуальное разделение представляет собой не что иное как исторический артефакт, с которым больше нельзя мириться. Согласно Кэндейс Перт, эти три системы следует рассматривать как нераздельные части единой психосоматической сети⁴⁰.

Пептиды — около 60— 70 особых макромолекул — вначале изучались в других контекстах, и им давали разные названия — гормоны, нейротрансмиттеры, эндорфины, факторы роста и т. д. Понадобилось много лет, чтобы увидеть в них единое семейство молекулярных посланников. Эти посланники представляют собой короткие цепочки аминокислот, которые прикрепляются к специфическим рецепторам, в изобилии рассеянными по поверхности всех клеток тела. Поддерживая взаимосвязь между иммунными клетками, железами и клетками мозга, пептиды формируют психосоматическую сеть, пронизывающую весь организм. Пептиды оказываются биохимическим проявлением эмоций; они играют очень важную роль в координирующей деятельности иммунной системы; они связывают и объединяют ментальную, эмоциональную и биологическую деятельность.

Решающие перемены в наших представлениях начались в 80-е годы, когда было сделано парадоксальное открытие: определенные гормоны, которые, как предполагалось, производятся железами, оказались пептидами; более того, выяснилось, что они также производятся и хранятся в мозге. С другой стороны, ученые обнаружили, что нейротрансмиттеры, именуемые *эндорфинами*, которые, как считалось, производятся только в мозге, генерируются также иммунными клетками. По мере того как обнаруживалось все больше и больше пептидных рецепторов, становилось очевидным, что практически любой из известных пептидов может производиться и в мозге, и в различных частях тела. И тогда Кэндейс Перт провозглашает: «Я больше не могу проводить четкое разграничение между мозгом и телом»⁴¹.

В нервной системе пептиды производятся в нервных клетках и затем перемещаются вниз по аксонам (длинным ответвлениям нервных клеток), где и хранятся на дне в виде крошечных шариков до тех пор, пока соответствующие сигналы не освободят их для деятельности. Эти пептиды играют существенную роль в поддержании связи внутри нервной системы. Традиционно считалось, что передача нервных импульсов происходит через промежутки (*синапсы*) между соседними нервными клетками. Однако оказалось, что этот механизм не столь важен и используется главным образом для сокращения мускулов. Большинство сигналов, поступающих из мозга, передаются через пептиды, генерируемые нервными клетками. Прикрепляясь к рецепторам вдали от «материнских» нервных клеток, эти пептиды функционируют не только в пределах всей

нервной системы, но и в других тканях тела.

В иммунной системе белые кровяные клетки не только обладают рецепторами для всех пептидов, но и *сами производят* пептиды. Пептиды управляют миграционными паттернами клеток и всеми их жизненными функциями. Это открытие, как и успехи когнитивной иммунологии, несомненно, должно найти замечательные терапевтические применения. Перт и ее команда недавно открыли новый многообещающий метод лечения СПИДа, названный *Пептидом Т*⁴². Ученые выдвинули гипотезу, что СПИД обусловлен нарушением пептидных связей. Установив, что ВИЧ (вирус иммунодефицита человека) проникает в клетки через определенные пептидные рецепторы, нарушая тем самым функции всей сети, Перт и ее коллеги спроектировали защитный пептид, который прикрепляется к этим рецепторам и блокирует воздействие вируса. (Пептиды возникают естественным образом в теле, но они могут быть также спроектированы и синтезированы). Пептид Т имитирует деятельность естественных пептидов, и, следовательно, он совершенно не токсичен, в отличие от других препаратов против СПИДа. В настоящее время это средство проходит клинические испытания. Если оно окажется эффективным, в лечении СПИДа может произойти настоящая революция.

Еще один замечательный аспект недавно признанной психосоматической сети: пептиды оказались биохимическим проявлением эмоций. Большинство пептидов, если не все, влияют на поведение и настроение, и сегодня ученые выдвигают гипотезу, что каждый пептид, вероятно, порождает уникальный *эмоциональный тон*. Вся группа из 60—70 пептидов, возможно, составляет универсальный биохимический язык эмоций.

Нейробиологи традиционно связывали эмоции со специфическими областями мозга, в частности с лимбической системой. И это действительно так. Оказывается, что лимбическая система сильно насыщена пептидами. Однако это не единственная часть тела, где сконцентрированы пептидные рецепторы. Например, весь наш кишечник наполнен пептидными рецепторами. Вот почему мы «чувствуем нутром». Мы буквально ощущаем эмоции в своем кишечнике.

Если верно, что каждый пептид передает особое эмоциональное состояние, это означает, что все сенсорные ощущения, все мысли — фактически все телесные функции — окрашены эмоционально, поскольку все они связаны с пептидами. Действительно, ученые наблюдали, что узловые точки нервной системы, через которые осуществляется связь сенсорных органов с мозгом, обогащены пептидными рецепторами, которые фильтруют сенсорные восприятия и определяют их приоритет. Другими словами, все наши восприятия и мысли окрашены эмоциями. Все

это, конечно, хорошо известно нам из опыта.

Из признания такой психосоматической сети вытекает, что нервная система не структурирована иерархически, как это полагалось раньше. Как отмечает Кэндейс Перт, «белые кровяные клетки — это частицы мозга, путешествующие по всему телу»⁴³. В конечном итоге это означает, что познание есть феномен, сфера действия которого охватывает весь организм. Познание осуществляется через сложную химическую — пептидную — сеть, которая объединяет нашу ментальную, эмоциональную и биологическую деятельность.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 11

- 1.См. выше, ее. 191— 192.
- 2.См. Windelband(1901), pp. 232-33.
- 3.См. выше, с. 190 и далее.
- 4.См. Varela et al.(1991), pp. 4ff.
- 5.См. выше, с. 83 и далее.
- 6.См. Varela et al.(1991), pp. 8, 41.
- 7.Там же, p. 93— 94.
- 8.См. Gluck and Rumelhart(1990).
- 9.См. Varela et al.(1991), p. 94.

- 10.См. выше, с. 114.
- 11.См. там же.
- 12.См. выше, с. 237— 238.
- 13.Maturana and Varela(1987), p. 174.
- 14.См. Margulis and Sagan(1995), p. 179.
- 15.Varela et al.(1991), p. 200.
- 16.Там же, p. 177.
- 17.См. ниже, с. 287 и далее.
- 18.См. ниже, с. 315— 316.
- 19.См. ниже, с. 310— 311.
- 20.Varela et al.(1991), p. 135.
- 21.См. ниже, с. 310— 311.
- 22.Varela et al.(1991), p. 140.
- 23.Там же, p. 101.
- 24.См. выше, с. 189.
- 25.Dell(1985).
- 26.См. Приложение, с. 327 и далее.
- 27.Winograd and Flores(1991),p. 97.
- 28.См. там же, pp. 93ff.
- 29.Там же, pp. 107ff.
- 30.Там же,р. 113.
- 31.Там же, pp. 133ff.
- 32.Там же, p. 132.
- 33.Dreyfus and Dreyfus(1986),p. 108.
- 34.См. Varela and Coutinho(1991a).

35. См. Varela and Coutinho(1991b).
36. Varela and Coutinho(1991a).
37. Там же.
38. См. Varela and Coutinho(1991b).
39. Франциско Варела, частная беседа, **апрель 1991.**
40. Pert et al.(1985), Pert(1993).
41. Pert(1989).
42. См. Pert(1992), Pert(1995). 43. Pert(1989).

Глава 12

Знать о своем знании

Для того чтобы отождествить познание со всем процессом жизни — включая восприятия, эмоции и поведение — и понимать его как процесс, который не включает ни передачи информации, ни ментального отображения внешнего мира, мы нуждаемся в радикальном расширении рамок науки и философии. Одна из причин, по которой этот взгляд на разум и познание так трудно принять, состоит в том, что он противоречит нашему повседневному опыту и интуиции. Как человеческие существа, мы часто пользуемся понятием информации и постоянно формируем ментальные отображения людей и объектов из нашего окружения.

Между тем эти весьма специфические особенности человеческого познания обусловлены нашей способностью абстрактно мыслить — ключевой характеристикой человеческого сознания. Таким образом, для полной картины общего процесса познания в живых системах нам важно понять, каким образом из когнитивного процесса, характерного для всех живых организмов, возникает человеческое сознание с его абстрактной мыслью и концептуальными понятиями.

На последующих страницах термин *сознание* применяется к такому уровню разума, или познания, когда уже возникло самосознание. Осознание окружающей среды, согласно теории Сантьяго, является свойством познания на всех уровнях жизни. Самосознание, насколько нам известно, присуще только высшим животным и в полной мере проявляется только в человеческом разуме. Будучи людьми, мы осознаем и окружающую среду, и самих себя, и свой внутренний мир. Другими словами, мы осознаем, что мы осознаем. Мы не просто знаем, но и знаем о своем знании. Именно эту особенность самосознания я имею в виду, когда использую термин сознание.

Язык и общение

В теории Сантьяго самосознание рассматривается в тесной связи с языком, а понимание языка достигается через тщательный анализ общения. Такой подход к пониманию сознания был впервые предложен Умберто Матураной¹.

Общение, согласно Матуране, это не процесс передачи информации, а координация поведения живых организмов посредством их взаимного структурного сопряжения. Эта взаимная координация поведения является ключевой характеристикой общения всех живых организмов, независимо от наличия у них нервной системы, и становится все более утонченной и сложной по мере нарастания сложности нервных систем.

Птичье пение — одна из самых прекрасных форм общения в мире

животных. Матурана приводит в качестве поразительного примера брачную песню африканских попугаев. Эти птицы часто обитают в густых лесах, где практически исключена возможность зрительного контакта. В условиях этой окружающей среды пары попугаев формируют и координируют свой брачный ритуал, совместно исполняя особую песню. Случайному слушателю кажется, что каждая из птиц исполняет самостоятельную мелодию, однако при ближайшем рассмотрении, эта песня на самом деле оказывается дуэтом, в котором две птицы попеременно подхватывают и развивают мотивы друг друга.

Песня каждой пары неповторима, она не передается потомству. В каждом поколении новые пары создают собственные оригинальные мелодии для брачного ритуала. По словам Матураны:

В этом случае (в отличие от многих других птиц) вокальная координация поведения в поющей паре является онтогенетическим феноменом [феноменом развития отдельных особей]... Конкретная мелодия каждой пары птиц этого вида уникальна и связана с историей их спаривания².

Этот понятный и красивый пример подтверждает мысль Матураны о том, что общение, в сущности, есть координация поведения. В других случаях мы склонны описывать общение в семантических терминах, т. е. как обмен информацией, в которой заложен некоторый смысл. Однако согласно Матуране, такие семантические описания являются проекциями наблюдателя-человека. В реальности же координация поведения обуславливается не смыслом, а динамикой структурного сопряжения.

Поведение животных может характеризоваться врожденными («инстинктивными») или благоприобретенными чертами, и, соответственно, можно различать инстинктивный и благоприобретенный тип общения. Тип общения, развитый в процессе обучения, Матурана называет *лингвистическим*. И хотя это еще не язык, с языком его роднит характерная особенность, заключающаяся в том, что одна и та же координация поведения может быть осуществлена посредством взаимодействий различного типа. Как и различные языки человеческого общения, различные виды структурного сопряжения, развитые разными путями, могут привести к одинаковой координации поведения. Именно такое *лингвистическое поведение* лежит, по мнению Матураны, в основе языка.

Лингвистическое общение требует наличия достаточно сложной нервной системы, поскольку оно включает очень сложные формы обучения. Например, когда пчелы сообщают друг другу, где расположены определенные цветы, сплетая в танце сложные паттерны, этот танец отчасти основан на инстинктивном поведении, а частично усвоен в

процессе обучения. Лингвистические (или благоприобретенные) компоненты этого танца обусловлены контекстом и социальной историей особи. Пчелы из различных роев танцуют, можно сказать, на разных «диалектах».

Даже самые изощренные формы лингвистического общения — например, так называемый «язык» пчел — это еще не язык. Согласно Матуране, язык появляется тогда, когда возникает *общение по поводу общения*. Другими словами, процесс *оязычивания* [*linguaging*], как его называет Матурана, знаменует собой координацию координации поведения. Матурана любит иллюстрировать это свойство языка на примере гипотетического общения кошки с хозяином³.

Представьте себе, что каждое утро моя кошка мяукает и бежит к холодильнику. Я следую за ней, достаю немного молока, наливаю его в миску, и кошка начинает его лакать. Это и есть общение — координация поведения через постоянное взаимодействие, или взаимное структурное сопряжение. Теперь представьте, что в одно прекрасное утро я не реагирую на мяуканье кошки, так как знаю, что молоко кончилось. Если бы кошка могла сообщить мне что-то вроде: «Эй, я уже мяукнула три раза; где мое молоко?», — это был бы язык. Ее ссылка на предшествующее мяуканье составляла бы сообщение по поводу сообщения и, следовательно, по определению Матураны, квалифицировалась бы как язык.

Кошки не умеют использовать язык в этом смысле, но, по-видимому, он доступен человекообразным обезьянам. Американские психологи показали, что шимпанзе способны не только выучить множество стандартных символов языка жестов, но и создавать новые выражения, комбинируя различные жесты⁴. Так, одна из шимпанзе по имени Люси изобрела несколько знаковых комбинаций: «плод-пить» для арбуза, «пища-плакать-сильный» для редьки и «открывать-пить-есть» для холодильника.

Однажды Люси очень расстроилась, увидев, что ее человеческие «родители» собираются уходить. Она обратилась к ним и показала жестами «Люси-плакать». Делая это заявление по поводу своего плача, она явно общалась по поводу общения. «Нам кажется, — пишут Матурана и Варела, — что в этот момент Люси начала оязычиваться»⁵.

Хотя некоторые приматы, очевидно, обладают потенциалом для общения на языке жестов, их лингвистическая сфера крайне ограничена и даже не приближается к богатству человеческого языка. В человеческом языке открывается огромное пространство, в котором слова служат жетонами для лингвистической координации действий, а также для создания понятий об объектах. Например, во время пикника мы можем

использовать слова для лингвистического различения, координируя свои действия при накрывании пня скатертью и его сервировке. Кроме того, мы можем также опираться на эти лингвистические различия (т. е. проводить различие между различениями), используя слово «стол» и, тем самым, творя объект.

В таком случае объекты, по мнению Матураны, являются лингвистическими различениями лингвистических различений, и, поскольку существуют объекты, мы можем создавать абстрактные понятия — такие как, например, высота стола, — проводя различие различений различения и т. д. Пользуясь терминологией Бэйтсона, можно сказать, что иерархия логических типов возникает вместе с человеческим языком⁶.

Оязычивание

Более того. Наши лингвистические различения не изолированы, но существуют «в сети структурных сопряжений, которую мы непрерывно сплетаем через [оязычивание]»⁷. Значение возникает как паттерн взаимоотношений между этими лингвистическими различениями; таким образом, мы существуем на «семантической территории», созданной нашим оязычиванием. И, наконец, возникает самосознание — когда мы используем представление об объекте и связанные с ним абстрактные понятия для описания самих себя. Таким образом, лингвистическая территория человека простирается еще дальше, включая рефлексии и сознание.

Уникальность человеческого бытия заключается в нашей способности непрерывно создавать лингвистическую сеть, в которую вплетены и мы сами. Быть человеком — значит существовать в языке. Через язык мы координируем наше поведение, через язык мы вместе творим мир. «Тот мир, который каждый из нас видит, — пишут Матурана и Варела, — не есть *определенный* мир, но *некий* мир, который мы созидаем вместе с другими»⁸. Человеческий мир зиждется на нашем внутреннем мире абстрактной мысли, понятий, символов, ментальных отображений и самосознания. Быть человеком — значит обладать рефлексивным сознанием: «Узнавая, как мы знаем, мы творим себя»⁹.

В ходе беседы наш внутренний мир понятий и идей, наши эмоции и телесные движения вступают в тесную взаимосвязь, формируя сложную хореографию поведенческой координации. Анализ видеозаписей показал, что каждая беседа включает утонченный и, по большей части, бессознательный танец, в котором последовательность речевых паттернов синхронизируется не только с мельчайшими телесными движениями говорящего, но и с соответствующими движениями слушателя. Оба партнера включены в эту точно синхронизированную последовательность ритмических движений, и лингвистическая координация их взаимно

обусловленных действий длится до тех пор, пока поддерживается беседа¹⁰.

Теория Матураны, трактующая сознание, фундаментально отличается от других подобных теорий тем, что основной ее акцент ставится на язык и общение. С точки зрения теории Сантьяго, модные сегодня попытки объяснить человеческое сознание через квантовые эффекты в мозге или через другие нейрофизиологические процессы обречены на провал. Самосознание и раскрытие внутреннего мира понятий и идей не поддаются объяснению не только на языке физики и химии; они не могут быть поняты даже через биологию или психологию отдельного организма. Согласно Матуране, мы можем понять человеческое сознание только через язык и полный социальный контекст, в который он включен. Сама семантика слова — «сознание» (совместное знание) — предполагает, что речь идет, по существу, о феномене социальном.

Полезно сравнить понятие *творение мира* также с древнеиндийским понятием *майя*. В ранней индуистской мифологии слово *майя* означало «магическую творческую силу», с помощью которой создается мир в божественной игре Брахмана¹¹. Мириады воспринимаемых нами форм создаются божественным актером и магом, а динамической силой, двигателем его игры является *карма*, дословно означающая «деяние».

По прошествии нескольких веков смысл слова *майя* — одного из важнейших понятий в индийской философии — изменился. Вместо творческой силы Брахмана оно стало обозначать психологическое состояние человека под чарами магической игры. Поскольку мы принимаем материальные формы игры за объективную реальность, не ощущая единства Брахмана, лежащего в основе всех этих форм, постольку находимся под влиянием чар *майи*.

Индуизм отрицает существование объективной реальности. Как и в теории Сантьяго, воспринимаемые нами объекты создаются через действие. Тем не менее здесь процесс созидания мира происходит в космическом масштабе, а не на уровне человеческого познания. Мир, творимый в индуистской мифологии, не является *неким* миром определенного человеческого сообщества, но представляет собой *конкретный* мир магической божественной игры, которая околдовывает всех нас.

Первичные состояния сознания

В последние годы Франциско Варела исследует еще один подход к сознанию, который, как он надеется, может внести дополнительное измерение в теорию Матураны. Его базовая гипотеза состоит в том, что все высшие позвоночные наделены некой формой первичного сознания, которая, не будучи еще саморефлексивной, уже включает в себя опыт «единого ментального пространства», или «ментального состояния».

Многочисленные недавние опыты над животными и людьми показали, что это ментальное пространство обладает многими измерениями; другими словами, оно создается множеством различных функций мозга. И все же это — единый, связный опыт. Например, когда аромат духов вызывает приятные или неприятные ощущения, мы испытываем единое, связанное ментальное состояние, в которое включены сенсорные ощущения, воспоминания и эмоции. Это переживание неустойчиво и, как мы знаем из опыта, может быть крайне непродолжительным. Ментальные состояния носят преходящий характер — они непрерывно возникают и исчезают. Однако не представляется возможным испытывать их иначе, чем на некотором конечном отрезке времени. Еще одно важное наблюдение заключается в том, что это эмпирическое состояние всегда «воплощено», т. е. включено в некоторое определенное поле ощущений. В самом деле, большинство ментальных состояний сопровождаются доминирующим чувством, которое дает окраску всему переживанию.

Варела недавно опубликовал статью, в которой он выдвигает свою базовую гипотезу и предлагает специфический нейронный механизм для формирования первичных состояний сознания у всех высших позвоночных¹². Ключевая идея состоит в том, что переходные эмпирические состояния порождаются резонансным феноменом, известным как *фазовая синхронизация*, при которой различные разделы мозга соединяются таким образом, что все их нейроны возбуждаются синхронно. Посредством такой синхронизации нейронной деятельности образуются временные *клеточные сообщества*, в которые могут входить обширные, распределенные по всему организму нейронные системы.

Согласно гипотезе Варелы, каждое когнитивное переживание основано на подобном клеточном сообществе, в котором различные типы нейронной активности (сопровождающие сенсорные ощущения, эмоции, память, телесные движения и т. п.) объединяются во временный, но согласованный ансамбль осциллирующих нейронов. Тот факт, что нейронные цепи, как правило, осциллируют в ритмичном режиме, хорошо известен нейробиологам, а последние исследования показали, что эти осцилляции не ограничиваются корой головного мозга, но распространяются на различные уровни нервной системы.

Многочисленные эксперименты, упомянутые Варелой в подтверждение этой гипотезы, показывают, что когнитивные эмпирические состояния возникают благодаря синхронизации быстрых осцилляций в *гамма*- и *бета*-диапазонах; такие осцилляции обычно очень быстро возникают и затухают. Каждой фазовой синхронизации соответствует характерное время затухания — оно и определяет минимальную длительность переживания.

Гипотеза Варелы устанавливает нейробиологическую основу для различения сознательного и бессознательного познания, которую нейробиологи искали с тех пор, как Зигмунд Фрейд открыл человеческое бессознательное¹³. Согласно Вареле, первичное сознательное переживание, характерное для всех высших позвоночных, не сосредоточено в конкретном разделе мозга и не может быть определено в рамках специфических нейронных структур. Это не что иное, как проявление конкретного когнитивного процесса — преходящая, кратковременная синхронизация разнообразных ритмично осциллирующих нейронных цепей.

Человеческое состояние

Человеческие существа эволюционировали из прямоходящих *южных обезьян* (род *Australopithecus*) около двух миллионов лет назад. Переход от обезьян к людям, как мы узнали из прошлых глав, стимулировали две выразительные особенности развития: беспомощность несформированных новорожденных детей, которые нуждались в поддержке семьи и сообщества, и свобода рук, позволявшая изготавливать и использовать орудия; все это способствовало развитию мозга и, вероятно, эволюции языка¹⁴.

Теория языка и сознания, предложенная Матураной, позволяет установить связь между этими двумя побудительными эволюционными аспектами. Поскольку язык обеспечивает весьма утонченную и эффективную координацию поведения, эволюция языка позволила первобытным людям значительно повысить уровень сотрудничества и развить семьи, сообщества и племена, что давало им огромные эволюционные преимущества. Решающая роль языка в человеческой эволюции состояла не в возможности обмена идеями, но в расширении возможностей сотрудничества.

С ростом многообразия и богатства человеческих взаимоотношений, соответственно, раскрывалось и человечество — его язык, искусство, мысль и культура. В это же время совершенствовалась наша способность к абстрактному мышлению, создавался наш внутренний мир понятий, объектов и образов самих себя. Постепенно, по мере того как этот внутренний мир становился более разнообразным и сложным, мы теряли связь с природой и превращались во все более «отдельных» личностей.

Так возник конфликт между целостностью и отдельностью, между телом и душой; поэты, философы и мистики всех времен и народов считали этот конфликт сутью человеческого состояния. Человеческое сознание породило не только пещерные рисунки Шове, Бхагавад-гиту, Бранденбургские концерты и теорию относительности, но также и рабство, охоту на ведьм, холокост, бомбардировку Хиросимы. Среди всех

биологических видов наш — единственный, в пределах которого особи уничтожают друг друга ради религиозных, рыночных, патриотических и других абстрактных идей.

В буддийской философии ярко представлены некоторые важнейшие проявления человеческого состояния и его корней в языке и сознании¹⁵. Экзистенциальное человеческое страдание возникает, по мнению буддистов, когда мы цепляемся за постоянные формы и категории, созданные разумом, вместо того чтобы принять непостоянную, преходящую природу всех вещей. Будда учил, что все постоянные формы — вещи, события, люди или идеи — не что иное как *майя*. Подобно ведическим пророкам и мудрецам, он пользовался этим древним понятием, но он спустил его с космического уровня, который оно занимает в индуизме, и соединил с процессом человеческого познания, тем самым придав ему свежее, почти психотерапевтическое звучание¹⁶. В силу собственного невежества (*авидья*), мы делим воспринимаемый мир на отдельные объекты, которые кажутся нам прочными и постоянными, но которые на самом деле переменчивы и преходящи. Цепляясь за свои жесткие категории, не понимая текучести жизни, мы обречены переживать страдание за страданием.

Буддистское учение о непостоянстве включает концепцию о несуществовании «я» — постоянного субъекта наших меняющихся переживаний. Главная идея заключается в том, что изолированное, индивидуальное «я» — это иллюзия, всего лишь одно из воплощений *майи*, интеллектуальное понятие, за которым нет никакой реальности. Цепляние за эту идею изолированного «я» приводит к такой же боли и страданию (*дукха*), как и приверженность к любой другой застывшей мысленной категории.

Когнитивная наука пришла к точно такой же позиции¹⁷. Согласно теории Сантьяго, мы творим свое «я» точно так же, как творим объекты. Наше «я», или *эго*, не существует независимо, но является результатом нашего внутреннего структурного сопряжения. Тщательный анализ веры в независимое, постоянное «я», а также ее последствий — «картезианской тревоги» — привел Франциско Варелу и его коллег к следующему заключению:

Наш лихорадочный поиск внутренней твердой почвы — это и есть сущность *эго*, источник постоянной фрустрации... Поиск внутреннего основания составляет только часть более крупного паттерна поиска, в который входит и наше цепляние за внешнее основание — в форме идеи о предопределенном и независимом мире. Другими словами, наш поиск основания, внутреннего или внешнего, является глубоким источником разочарований и тревог¹⁸.

Итак, это одна из тяжелейших проблем человеческого состояния. Мы — автономные индивиды, сформированные собственной историей структурных изменений. Мы осознаем себя, осознаем свою индивидуальную идентичность — и все же, когда мы ищем независимую самость в рамках мира нашего опыта, все эти поиски заканчиваются неудачей.

Происхождение этой дилеммы определяется нашей тенденцией создавать абстракции изолированных объектов, включая изолированное «я», и потом верить в то, что они принадлежат объективной, независимо существующей реальности. Чтобы преодолеть картезианскую тревогу, нам необходимо мыслить системно, сдвигая свой концептуальный фокус от объектов к взаимоотношениям. Только тогда мы сможем понять, что идентичность, индивидуальность и автономия отнюдь не означают изолированность и независимость. Как напоминают нам Линн Маргулис и Дорион Саган, «независимость — это политический, а не научный термин»¹⁹.

Сила абстрактного мышления побуждает нас обращаться с естественной окружающей средой — паутиной жизни — так, как если бы она состояла из изолированных частей, предназначенных для эксплуатации различными заинтересованными группами. Более того, мы распространили этот «фрагментный» взгляд и на свое человеческое общество, деля его на различные национальные, расовые, религиозные и политические группы. Вера в то, что все эти фрагменты — внутри нас самих, в нашей окружающей среде и в нашем обществе — действительно изолированы, отчуждает нас от Природы и от своих же братьев-людей, тем самым ослабляя нас. Для восстановления нашей человечности в полной мере мы должны снова обрести свой опыт связности, единства со всей паутиной жизни. Это воссоединение, *religio* по латыни, есть самая суть духовных основ глубокой экологии.

ПРИМЕЧАНИЯ К ГЛАВЕ 12

1. Maturana(1970),MaturanaandVarela(1987),Maturana(1988).
2. Maturana and Varela(1987),pp. 193-4.
3. Умберто Матурана, частная беседа, 1985.
4. См. Maturana and Varela(1987), pp. 212ff.
5. Там же, p. 215.
6. См. Приложение, с. 327-329.
7. Maturana and Varela(1987), p. 234.
8. Там же, p. 245.
9. Там же, p. 244.
10. См. Сарга(1982),p. 302.
11. См. Сарга(1975),p. 88.
12. Varela(1995).

13. См. Сарга(1982),p. 178.
14. См. выше, с. 278.
15. См. Varela et al.(1991), pp. 217ff.
16. См. Сарга(1975), pp. 93ff.
17. См. Varela et al.(1991), pp. 59ff.
18. Там же, p. 143.
19. Margulis and Sagan(1995), p. 26.

ЭПИЛОГ.

Экологическая грамотность

Воссоединение с паутиной жизни означает построение и поддержание *устойчивых сообществ* — таких, в которых мы сможем удовлетворять наши нужды и чаяния, не ущемляя возможностей будущих поколений. Решая эту задачу, мы могли бы получить ценные уроки от экосистем, представляющих устойчивые сообщества растений, животных и микроорганизмов. Но чтобы понять эти уроки, необходимо изучить основные принципы экологии — стать экологически грамотными. Быть экологически грамотным означает понимать принципы организации экологических сообществ (т. е. экосистем) и использовать эти принципы для создания устойчивых человеческих сообществ. Нам необходимо вдохнуть жизнь в наши сообщества — включая образовательные, деловые и политические сообщества — так, чтобы принципы экологии проявились в них именно как принципы обучения, менеджмента и политики.

Теория живых систем, предложенная в этой книге, дает концептуальную структуру для сравнений между экологическими и человеческими сообществами. Оба эти типа сообществ характеризуются одинаковыми базовыми принципами организации. Они представляют собой сети организационно замкнутые, но открытые потоку энергии и ресурсов; их структуры обуславливаются их историями структурных изменений; они разумны благодаря имманентным когнитивным свойствам процесса жизни.

Конечно, существует много различий между экосистемами и человеческими сообществами. В экосистемах нет самосознания, сознания, языка и культуры; нет, следовательно, правосудия и демократии; но вместе с ними отсутствует алчность и обман. Изучение экосистем не даст нам новых знаний в области этих человеческих ценностей и недостатков. Но мы можем (и должны) научиться у них тому, как организовать устойчивое существование. В течение более трех миллиардов лет эволюции экосистемы планеты выработали утонченные и сложные механизмы, обеспечивающие максимальную устойчивость. Эта мудрость природы составляет суть экологической грамотности.

Основываясь на понимании экосистем как автопоэзных сетей и диссипативных структур, мы в состоянии сформулировать набор принципов организации, которые можно было бы определить как базовые принципы экологии и использовать для построения устойчивых человеческих сообществ.

Первый из этих принципов — *взаимозависимость*. Все члены экологического сообщества взаимосвязаны через обширную и сложную сеть взаимоотношений, паутину жизни. Они обретают свои жизненно

важные свойства и, фактически, само свое существование через взаимоотношения с другими объектами. Взаимозависимость — взаимная зависимость всех жизненных процессов друг от друга — заложена в природе любых экологических взаимоотношений. Поведение каждого живого члена экосистемы зависит от поведения многих других. Успех всего сообщества зависит от успеха его индивидуальных членов, как и успех каждого члена зависит от успеха общества в целом.

Понимать экологическую взаимозависимость — значит понимать взаимоотношения. Это требует сдвига восприятия, перехода к системному мышлению — от частей к целому, от объектов к взаимоотношениям, от содержания к паттернам. Устойчивое человеческое сообщество осознает все множество взаимоотношений между своими членами. Заботиться о сообществе — значит заботиться об этих взаимоотношениях.

Тот факт, что базовым паттерном жизни является сетевой паттерн, означает, что взаимоотношения между членами экологического сообщества нелинейны и включают множество петель обратной связи. В экосистемах редко встречаются линейные цепочки причинно-следственных связей. Так, возмущение не ограничивается отдельным эффектом, но, как правило, движется дальше в виде непрерывно расширяющегося паттерна. Оно может даже усиливаться во взаимозависимых петлях обратной связи, полностью теряя первоначальный источник возмущения.

Другим важным принципом экологии является циклическая природа экологических процессов. Петли обратной связи экосистемы служат теми магистралями, по которым обращаются и перерабатываются питательные вещества. Будучи открытыми системами, все организмы экосистемы производят отходы, но то, что является отходами для одного вида, служит пищей для другого, поэтому в экосистеме в целом отходы отсутствуют. Сообщества организмов эволюционировали в этом направлении в течение миллиардов лет, непрерывно используя и перерабатывая одни и те же молекулы минералов, воды и воздуха.

Урок для человеческих сообществ здесь очевиден. Основной конфликт между экономикой и экологией обусловлен тем фактом, что природа циклична, а наши промышленные системы линейны. Наши компании забирают ресурсы, трансформируют их в товар плюс отходы и продают товары потребителям, которые порождают новые отходы после потребления этих товаров. Устойчивые паттерны производства и потребления должны быть циклическими, максимально подобными циклическим процессам в природе. Чтобы сформировать такие циклические паттерны, необходимо в корне реорганизовать наш бизнес и экономику³.

Экосистемы отличаются от индивидуальных организмов тем, что они по большей части (хотя и не полностью) являются закрытыми системами по отношению к потоку материи, но открытыми — по отношению к потоку энергии. Первичным источником потока энергии служит Солнце. Солнечная энергия, перерабатываемая в химическую путем фотосинтеза в зеленых растениях, является движущим началом большинства экологических циклов.

Здесь опять очевидны поучительные образцы для формирования устойчивых человеческих сообществ. Солнечная энергия во всем ее многообразии — солнечный свет как прямое нагревание, фотоэлектричество, ветер, энергия воды, биомасса и т. д. — это единственный возобновляемый вид энергии, экономически эффективный и благоприятный для окружающей среды. Игнорируя этот экологический факт, наши политические и корпоративные лидеры снова и снова подвергают опасности здоровье и благосостояние миллионов людей во всем мире. Например, война в Персидском заливе, которая в 1991 году уничтожила сотни тысяч людей, разорила миллионы и вызвала беспрецедентные экологические катастрофы, во многом была вызвана порочной энергетической политикой администраций Буша и Рейгана.

Когда мы говорим о солнечной энергии как об экономически эффективной, то предполагаем, что издержки производства энергии подсчитываются честно. К сожалению, этого не бывает в большинстве современных экономических систем. Так называемый «свободный рынок» не предоставляет потребителям надлежащей информации, поскольку социальные и экологические издержки производства не входят в прибыльные экономические модели⁴. Эти составляющие рассматриваются корпоративными и правительственными экономистами как «внешние» переменные, потому что они не согласуются с их теориями.

Корпоративные экономисты рассматривают в качестве бесплатного сырья не только воздух, воду и почву, но также и хрупкую паутину социальных отношений, на которую продолжающаяся экономическая экспансия оказывает весьма неблагоприятное влияние. Частные доходы оборачиваются растущими государственными расходами на восстановление разрушенной окружающей среды и поддержание уровня жизни общества, не говоря о том, что представляют собой прямое ограбление будущих поколений. Информация, доходящая до нас с рыночной площади, попросту ложна. Налицо отсутствие обратной связи, и элементарная экологическая грамотность подсказывает, что такая система не может быть устойчивой.

Один из наиболее эффективных способов изменения ситуации заключается в проведении реформы экологического налогообложения.

Такая налоговая реформа могла бы быть нейтральной по отношению к доходам и переместить всю нагрузку налогов на доход на *эко-налоги*. Это означает, что налогами должны облагаться существующие товары, формы энергии, службы и материалы таким образом, чтобы цены более объективно отражали истинные издержки⁵. Для того чтобы быть успешной, налоговая реформа должна представлять собой медленный долговременный процесс, который давал бы новым технологиям и паттернам потребления достаточно времени для адаптации. Кроме того, *эко-налоги* должны применяться предсказуемо, чтобы стимулировать промышленные инновации.

Такая долговременная и медленная экологическая налоговая реформа постепенно вытеснит с рынка расточительные и вредные технологии и паттерны потребления. По мере того как будут повышаться цены на энергию, с соответствующим компенсирующим снижением налогов на доходы, люди станут постепенно предпочитать автомобилям велосипеды, пользоваться общественным транспортом для поездок на работу. С ростом налогов на продукцию нефтехимии и топливо (с соответствующим снижением налогов на доходы) органическое земледелие станет не только самым здоровым, но и самым дешевым средством производства продуктов.

В настоящее время введение *эко-налогов* серьезно обсуждается в нескольких европейских странах; рано или поздно они будут введены во всех странах мира. Чтобы сохранять компетентность в новых условиях, менеджерам и инвесторам придется стать экологически грамотными. В частности, чрезвычайно важным станет отчетливое представление о потоках энергии и материи, пронизывающих систему компании. В связи с этим особое значение приобретет недавно разработанная методика *эко-ревизии*⁶. Экологическая ревизия имеет дело с экологическими последствиями прохождения потоков материалов, энергии и людей через систему компании и, следовательно, с истинными издержками производства.

Партнерство — весьма существенная особенность устойчивых сообществ. Циклический обмен энергией и ресурсами в экосистеме укрепляется непрерывным сотрудничеством. Как мы видели, со времен появления первых ядерных клеток два миллиарда лет назад жизнь на Земле прошла через неуклонно усложняющиеся формы кооперации и совместной эволюции. Партнерство — тенденция объединяться, устанавливать связи, жить *друг в друге* и сотрудничать — одна из важнейших отличительных черт жизни.

В человеческих сообществах партнерство означает демократию и расширение прав личности, поскольку каждый член сообщества играет в

нем важную роль. Комбинируя принцип партнерства с динамикой изменений и развития, мы можем метафорически использовать термин *совместная эволюция* применительно и к человеческим сообществам. По мере развития партнерства каждый член сообщества начинает лучше понимать ближних. В условиях честного, доверительного партнерства оба партнера обучаются и изменяются — они совместно эволюционируют. Здесь мы опять замечаем глубокий конфликт между требованиями экологической устойчивости и тем, как структурированы наши современные сообщества, между экономикой и экологией. Экономика поощряет конкуренцию, экспансию и господство; экология — сотрудничество, сохранение и партнерство.

Упомянутые выше принципы экологии — взаимозависимость, циклический поток ресурсов, сотрудничество и партнерство — суть различные аспекты одного паттерна организации. Именно таким образом экосистемы организуют себя для достижения максимальной устойчивости. Усвоив этот паттерн, мы можем задать несколько более подробных вопросов. Например, насколько гибкими будут такие экологические сообщества? Как они будут реагировать на внешние возмущения? Эти вопросы подводят нас еще к двум принципам экологии — гибкости и разнообразию, — которые позволяют системам пережить возмущения и приспособиться к меняющимся условиям.

Гибкость экосистемы поддерживается ее многочисленными петлями обратной связи, которые, как правило, восстанавливают баланс в системе при отклонении от нормы, вызванном меняющимися внешними условиями. Например, если необыкновенно жаркое лето вызывает избыточный рост водорослей в озере, некоторые виды рыб, питающиеся этими водорослями, получают преимущество и начнут усиленно размножаться; возросшая популяция рыб начнет уничтожать водоросли. Когда основной источник их пищи иссякнет, рыбы начнут вымирать. По мере того как уменьшается количество рыб, водоросли восстанавливаются и снова заполняют озеро. Таким образом, первичное возмущение вызывает колебания, распространяющиеся по петле обратной связи до тех пор, пока не восстановится исходное равновесие в системе «рыбы-водоросли».

Возмущения такого рода происходят непрерывно, поскольку непрерывно меняется окружающая среда, и, соответственно, сеть отвечает на них постоянными колебаниями. Все переменные экосистем, доступные нашему наблюдению, — плотность популяции, наличие питательных веществ, паттерны погоды, и т. д., — всегда колеблются. И экосистемы поддерживают гибкость, готовность приспособиться к меняющимся условиям. Паутина жизни — это гибкая, постоянно флюктуирующая сеть. Чем больше переменных вовлечено в колебательные процессы, тем система более динамична, тем выше ее гибкость, тем более развита ее

способность приспосабливаться к меняющимся внешним условиям.

Все экологические колебания ограничиваются пределами допустимого. Всегда существует опасность разрушения системы, если колебания выйдут за эти пределы и система не сможет их компенсировать. То же самое верно и для человеческих сообществ. Отсутствие гибкости проявляется в стрессе. В частности, стресс возникает тогда, когда одна или более переменных оказываются вблизи своих экстремальных значений: это вызывает повышение жесткости и напряженности во всей системе. Временный стресс является неотъемлемым аспектом жизни, но продолжительный стресс для системы вреден и деструктивен. Эти соображения приводят к очень важному выводу: управление социальной системой — компанией, городом или экономикой — означает поиск *оптимальных* значений для системных переменных. Если кто-то пытается максимизировать — а не оптимизировать — любую отдельную переменную, это неизменно ведет к разрушению системы в целом.

Принцип гибкости предполагает также соответствующую стратегию разрешения конфликтов. В каждом сообществе непременно возникают противоречия и конфликты, которые не могут быть разрешены в пользу той или другой стороны. Например, каждое сообщество нуждается в стабильности *и* переменах, порядке *и* свободе, традиции *и* инновации. Эти неизбежные конфликты гораздо эффективнее разрешаются динамическим уравниванием, чем жесткими решениями. Экологическая грамотность предполагает понимание того, что обе стороны конфликта могут быть важны в зависимости от ситуации и что противоречия внутри сообщества являются признаками его многообразия и здоровья и, следовательно, вносят свой вклад в жизнеспособность системы.

Роль многообразия в экосистемах тесно связана со структурой системной сети. Экологическая система, отличающаяся многообразием, будет также и гибкой, поскольку она содержит множество биологических видов с перекрывающимися экологическими функциями, так что они могут частично заменять друг друга. Когда в результате пагубного возмущения один из видов исчезает и обрывается одна из связей в сети, многообразие сообщества способствует выживанию и реорганизации, так как другие звенья системы могут, по крайней мере частично, выполнять функцию исчезнувшего вида. Другими словами, чем сложнее сеть, тем сложнее ее паттерн взаимосвязей — и тем большей гибкостью она будет отличаться.

Сложность сети экосистемы определяется ее биологическим многообразием; многообразие экологического сообщества обеспечивает ему гибкость. В человеческих сообществах этническое и культурное многообразие может играть ту же роль. Многообразие означает различные

взаимоотношения, множество различных подходов к одной проблеме.

Сообщество, основанное на многообразии, — гибкое сообщество; оно лучше приспосабливается к меняющейся ситуации.

Однако многообразие становится стратегическим преимуществом только в том случае, если это действительно чуткое, резонирующее сообщество, объединенное паутиной взаимоотношений. Если сообщество фрагментировано на изолированные группы и индивидуальности, многообразие может легко стать материалом для предрассудков и трений. Если же сообщество осознает взаимозависимость всех своих членов, тогда многообразие обогащает все взаимоотношения и, следовательно, обогащает все сообщество в целом, равно как и его индивидуальных членов. В таком сообществе информация и идеи свободно перемещаются по всей сети, а многообразие интерпретаций и способов познания — и даже многообразие ошибок — обогащают все сообщество в целом.

Таковы некоторые базовые принципы экологии — взаимозависимость, замкнутый цикл переработки, партнерство, гибкость, многообразие и, как следствие этих качеств, устойчивость. По мере того как XX век близится к завершению и мы входим в новое тысячелетие, выживание человечества все в большей степени будет зависеть от нашей способности понять эти принципы и жить в соответствии с ними.

ПРИМЕЧАНИЯ К ЭПИЛОГУ

1.См.Огг(1992).

2.О применении принципов экологии к образованию см. Capra(1993); о применении в бизнесе см. Callenbach et al.(1993), Capra et al.(1995); о применении в политике см. Henderson (1995).

3.См.Hawken(1993).

4.См. там же, р. 75.

5.См. Hawken(1993), р. 177; Daly(1995).

6.См. Callenbach et al.(1993).

Приложение: Возвращаясь к Бэйтсону

В этом приложении мы рассмотрим шесть критериев ментального¹ процесса, предложенных Бэйтсоном, и сравним их с теорией Сантьяго, трактующей познание.

1. *Разум представляет собой совокупность взаимодействующих частей, или компонентов.*

Этому критерию отвечает концепция автопозной сети, которая является сетью взаимодействующих компонентов.

2. *Взаимодействие между частями инициируется различием.*

Согласно теории Сантьяго, живой организм творит мир, осуществляя различие. Познание вытекает из паттерна различения, а различие — это восприятие различий. Например, бактерия, как было отмечено выше (с. 288— 289), воспринимает разницу в химической концентрации и температуре.

Таким образом, и Матурана, и Бэйтсон подчеркивают различие, но если для Матураны конкретные характеристики различия являются частью мира, который создается в процессе познания, Бэйтсон, как отмечает Делл, рассматривает различия как объективные качества мира. Это явствует из того, как Бэйтсон представляет понятие различия в «*Разуме и природе*»:

Получение информации неразрывно связано с получением новостей о *различии*, а всякое восприятие различия ограничено определенным порогом. Слишком слабые **или слишком медленные различия** недоступны восприятию².

По мнению Бэйтсона, следовательно, различия являются объективными особенностями мира, но не все различия воспринимаются. Те из них, которые не воспринимаются, он называет «потенциальными различиями», а воспринимаемые — «эффективными различиями». Эффективные различия, как поясняет Бэйтсон, становятся единицами информации, и он предлагает следующее определение: «Информация состоит из различий, которые составляют различие»³.

Вводя это определение информации как совокупности эффективных различий, Бэйтсон вплотную приближается к идее Матураны о том, что окружающая среда инициирует структурные изменения в живом организме. Бэйтсон подчеркивает также, что разные организмы воспринимают разные типы различий и что не существует ни объективной информации, ни объективного знания. Тем не менее он придерживается убеждения, что объективность существует «где-то там» в физическом мире, даже если мы не можем ее познать. Понятие о различиях как объективных качествах мира становится еще более явным в последних

двух критериях ментального процесса, предложенных Бэйтсоном.

3. Ментальный процесс требует дополнительной энергии.

Этим критерием Бэйтсон подчеркивает различие в том, как живые и неживые системы взаимодействуют со своей окружающей средой. Подобно Матуране, он четко различает реакцию материального объекта и ответ живого организма. Но Матурана описывает своеобразие ответа живого организма как структурное сопряжение и нелинейные паттерны организации, а Бэйтсон определяет ее через понятия энергии: «Когда я пинаю камень, я передаю ему энергию, и камень движется за счет этой энергии... Когда я пинаю собаку, она отвечает, используя энергию [полученную ею от] метаболизма»⁴.

Тем не менее Бэйтсон хорошо знал, что нелинейные паттерны организации являются основными характеристиками живых систем; это видно из его следующего критерия.

4. Ментальный процесс требует круговых (или еще более сложных) цепей, которые и определяют его как таковой.

Описание живых систем через нелинейные паттерны причинности стало ключевым для Матураны и привело его к концепции автопоэза.

Нелинейная причинность стала ключевой составляющей и в пригожинской теории диссипативных систем.

Таким образом, первые четыре критерия ментального процесса, предложенные Бэйтсоном, в неявном виде содержатся и в теории познания Сантьяго. В двух следующих критериях, однако, коренное различие между взглядами Бэйтсона и Матураны на познание становится очевидным.

5. В ментальном процессе последствия различий следует рассматривать как преобразования (т. е. закодированные версии) событий, которые им предшествовали.

Здесь Бэйтсон явно предполагает существование независимого мира, состоящего из объективных качеств, таких как объекты, события и различия. Эта независимо существующая реальность затем «преобразуется», или «перекодируется», во внутреннюю реальность. Другими словами, Бэйтсон придерживается представления о том, что познание включает в себя ментальное отображение объективного мира.

В последнем критерии Бэйтсон еще глубже развивает свою «отображенческую» позицию.

6. Описание и классификация этих процессов преобразования раскрывает иерархию логических типов, имманентных явлениям.

Чтобы объяснить этот критерий, Бэйтсон приводит пример двух организмов, взаимодействующих друг с другом. Следуя компьютерной модели познания, он описывает их общение в рамках сообщений — т. е.

объективных физических сигналов, например звуков, — которые посылаются одним организмом другому и затем кодируются, т. е. преобразуются в ментальные отображения.

В таком взаимодействии, подчеркивает Бэйтсон, полученная информация содержит не только сами сообщения, но и сообщения, касающиеся кодирования, т. е. относящиеся к другому классу информации. Эти сообщения о сообщениях, или «метасообщения», Бэйтсон относит к другому *логическому типу*, заимствуя этот термин у философов Бертрانا Расселла и Альфреда Норта Уайтхеда. Далее это предположение естественным путем приводит Бэйтсона к «сообщениям о метасообщениях» или, другими словами, об иерархии логических типов. Существование такой иерархии логических типов и составляет сущность последнего критерия Бэйтсона относительно ментального процесса.

Теория Сантьяго тоже дает описание общения между живыми организмами. По мнению Матураны, общение отнюдь не включает обмен сообщениями или информацией, но оно действительно содержит «общение по поводу общения», то есть то, что Бэйтсон называет иерархией логических типов. Однако согласно Матуране, такая иерархия возникает с развитием человеческого языка и самосознания и, вообще говоря, не является обязательной характеристикой феномена познания⁵. Развитие человеческого языка порождает абстрактное мышление, ментальные отображения, самосознание и другие качества сознания. По мнению Матураны, бэйтсоновские коды, преобразования и логические типы — два его последних критерия — не характерны для познания вообще, а только для человеческого сознания.

В последние годы своей жизни Бэйтсон напряженно искал дополнительные критерии, которые можно было бы применить к сознанию. И хотя он предполагал, что «этот феномен каким-то образом связан с функцией логических типов»⁶, ему так и не удалось сформулировать свои последние два критерия как критерии сознания, а не ментального процесса. Я полагаю, что эта неудача не позволила Бэйтсону добиться более глубокого понимания природы человеческого разума.

ПРИМЕЧАНИЯ К ПРИЛОЖЕНИЮ

¹ Bateson(1979), pp. 89ff. Об исторических и философских контекстах концепции ментального процесса, предложенной Бэйтсоном, см. выше, с. 190 и далее, с. 294 и далее.

² Bateson(1979), p. 29.

³ Там же, p. 99.

⁴ Там же, p. 101.

⁵ См. выше, с. 310— 311.

⁶ Bateson(1979), p. 128.

Библиография

Abraham, Ralph H., and Christopher D., Dynamics: The Geometry of Behaviour, Vols. 1-4, Aerial Press,

Santa Crus, California, 1982-88. Ashby, Ross, "Principles of the Self-Organizing Dynamic System", Journal of General Psychology, Vol.37, p. 125,1947.

Ashby, Ross, Design for a Brain, John Wiley, New York, 1952.

Ashby, Ross, Introduction to Cybernetics, John Wiley, New York, 1956.

Bachmann, Pascale Angelica, Peter Walde, Pier Luigi Luisi, and Jacques Lang, "Self-replicating Reverse

Micelles and Chemical Autopoiesis", Journal of the American Chemical Society, 112, 8200-8201, 1990.

Bateson, Gregory, Steps to an Ecology of Mind, Ballantine, New York, 1972.

Bateson, Gregory, Mind and Nature, Dutton, New York, 1979.

Bertalanffy, Ludwig von, "Der Organismus als physikalisches System betrachtet", Die Naturwissenschaften, Vol.28, pp.521-31,1940.

Bertalanffy, Ludwig von, "The Theory of Open Systems in Physics and Biology", Science, Vol. 111, pp. 23-29,1950.

Bertalanffy, Ludwig von, General System Theory, Braziller, New York, 1968.

Blake, Wiliam, Letter to Thomas Butts, 22 November 1802, in Alicia Ostriker (Ed.), Wiliam Blake: The Complete Poems, Penguin, 1977.

Bookchin, Murray, The Ecology of Freedom, Chesire Books, Palo Alto, CA, 1981.

Bowers, C.A., Critical Essays on Education, Modernity, and the Recovery of the Ecological Imperative, Teachers College Press, New York, 1993.

Briggs, John, and F. David Peat, Turbulent Mirror, Harper & Row, New York, 1989.

Brower, David, Let the Mountains Talk, Let the Rivers Run, Harper Collins, 1995.

Brown, Lester R., Building Sustainable Society, Norton, New York, 1981.

Brown, Lester R. et al., State of the World, Norton, New York, 1984-94. Burns, T.P., B.C. Patten, and H. Higashi, "Hierarchical evolution in ecological networks", in Higashi, M., and T.P. Burns, theoretical studies of ecosystems: the network perspective, Cambridge University Press, New York, 1991.

Butts, Robert, and James Brown (Eds.), Constructivism and Science, Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, 1989.

Calder, Nigel, Timescale, Viking, New York, 1983.

Callenbach, Ernest, Fritjof Capra, Leonore Goldman, Sandra Marburg, and Rudiger Lutz, *EcoManagement*, Berret-Koehler, San Francisco, 1993.

Cannon, Walter B., *The Wisdom of the Body*, Norton, New York, 1932; revised edition, 1939.

Capra, Fritjof, *The Tao of Physics*, Shambala, Boston, 1975; third updated edition, 1991.

Capra, Fritjof, *The Turning Point*, Simon and Schuster, New York, 1982.

Capra, Fritjof, *Wendezeit* (German edition of *The Turning Point*), Scherz, 1983.

Capra, Fritjof, "Bookstrap Physics: A Conversation With Geoffrey Chew", in Carleton de Tar, Jerry Finkelstein, and Chung-I Tan (Eds.), *A Passion for Physics*, World Scientific, Singapore, 1985; pp. 247-86.

Capra, Fritjof, "The Concept of Paradigm and Paradigm Shift", *Re-Vision*, Vol. 9, Number 1, p.3, 1986.

Capra, Fritjof, *Uncommon Wisdom*, Simon and Schuster, New York, 1988.

Capra, Fritjof, and David Steindl-Rast with Thomas Matus, *Belonging to the Universe*, Harper, San Francisco, 1991.

Capra, Fritjof (Ed.), *Guide to Ecoliteracy*, 1993; available from Center for Ecoliteracy, 2522 San Pablo Avenue, Berkley, CA 94702.

Capra, Fritjof and Gunter Pauli (Eds.), *Steering Business Toward Sustainability*, United Nations University Press, Tokyo, 1995.

Chauvet, Jean-Marie, eliette Brunei Deschamps et Christian Hillaire, *La Grotte Chauvet a Vallon-Pontd'Arc*, Seuil, Paris, 1995.

Checkland, Peter, *Systems Thinking Systems Practice*, John Wiley, New York, 1981.

Clark, John, (Ed.), *Renewing the Earth: Writings on Social Ecology in Honor of Murray Bookchin*,

Green Print, Bangstoke, Hampshire, ???.

Dantzig, Tobias, *Number: The Language of Science*, Fourth edition, Macmillan, New York, 1954.

Daly, Herman, "Ecological Tax Reform", in Capra and Pauli (1995), pp. 108- 24. Davidson, Mark, *Uncommon Sense: The Life and Thought of Ludwig von Bertalanffy*, Tarcher, Los Angeles, 1983.

Dell, Paul, "Understanding Maturana and Bateson", *Journal of Marital and Family Therapy*, Vol.11, pp.1-20, 1985.

Devall, Bill, and George Sessions, *Deep Ecology*, Peregrine Smith, Salt Lake City, 1985.

Dickson, Paul, *Think Tanks*, Atheneum, New York, 1971.

Dreyfus, Hubert, and Stuart Dreyfus, *Mind over Machine*, Free Press, New

York, 1986.

Driesch, Hans, *The Science and Philosophy of the Organism*, Aberdeen University Press, 1908.

Eigen, Manfred, "Molecular Self-Organisation and the Early Stages of Evolution", *Quarterly Reviews of Biophysics*, 4,2&3,1971.

Eisler, Wane, *The Chalice and the Blade*, Harper & Row, San Francisco, 1987.

Emery, F.E. (Ed.), *Systems Thinking: Selected Readings*, Penguin, 1969.

Farmer, Doyne, Tommaso Toffoli, and Stephen Wolfram (Eds.), *Cellular Automata*, North-Holland, 1984.

Fleischaker, Gail Raney, "Origins of Life: An operational definition", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere* 20,127-37,1990.

Fleischaker, Gail Raney (Ed.), "Autopoiesis in System Analysis: A Debate", *International Journal of General Systems*, Vol.21, No.2,1992.

Foerster, Heinz von and George W. Zopf (Eds.), *Principles of Self-Organisation*, Pergamon, New York, 1962.

Fox, Warwick, "The Deep Ecology — Ecofeminism Debate and its Parallels", *Environmental Ethics* 11, 5-25,1989.

Fox, Warwick, *Toward a Transpersonal Ecology*, Shambala, Boston, 1990.

Garcia, Lida, *The Fractal Explorer*, Dynamic Press, Santa Cruz, California, 1991.

Gardner, Martin, "The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game 'Life'", *Scientific American*, 223,4, pp.] 20-23,1970.

Gardner, Martin, "On Cellular Automata, Self-Reproduction, the Garden of Eden, and the Game 'Life'",

Scientific American, 224,2, pp. 112-17,1971.

Gimbutas, Marija, "Women and Culture in Goddess-Oriented Old Europe", in Charlene Spretnak(Ed-), *The Politics of Women's Spirituality*, Anchor, New York, 1982.

Gleick, James, *Chaos*, Penguin, 1987.

Gluck, Mark, and David Rumelhart, *Neuroscience and Connectionist Theory*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, 1990.

Gore, Al, *Earth in the Balance*, Houghton Mifflin, New York, 1992.

Gorelik, George, "Principal Ideas of Bogdanov's 'Tektology': the Universal Science of Organisation", *General Systems*, Vol.XX, pp.3-13,1975.

Gould, Stephen Jay, "Lucy on the Earth in Stasis", *Natural History*, No.9,1994.

Graham, Robert, "Contributions of Hermann Haken to Our Understanding of Coherence and Self-organisation in Nature", in R. Graham and A.

Wunderlin (Eds.)> Laser and Synergetics, Springer, Berlin, 1987.

Grof, Sanislav, Realms of the Human Unconscious, Dutton, New York, 1976.

Gutowitz, Howard (Ed.), Cellular Automata: The Theory and Experiment, MIT Press, 1991.

Haken, Hermann, Laser Theory, Springer, Berlin, 1983.

Haken, Hermann, "Synergetics: An Approach to Self-Organisation", in F.Eugene Yates (Ed.), Self-Organising Systems, Plenum, NY, 1987.

Haraway, Donna Jeanne, Crystals, Fabrics and Fields: Metaphors of Organicism in Twentieth-Century Developmental Biology, Yale University Press, 1976.

Harding, Stephan, "Gaia Theory", unpublished lecture notes, Schumacher College, Dartington, Devon, England, 1994.

Hawken, Paul, The Ecology of *Commenge*, Harper Collins, New York, 1993.

Heims, Steve T., John von Neumann and Norbert Wiener, MIT Press, Cambridge, Mass., 1980.

Heims, Steve J., The Cybernetics Group, MIT Press, Cambridge, Mass., 1991.

Jantsch, Erich, The Self-Organising Universe, Pergamon, New York, 1980.

Judson, Horace Freeland, The Eight Day of Creation, Simon and Schuster, New York, 1979.

Kane, Jeffrey, (Ed.), Holistic Education Review, Special Issue: Technology and Childhood, Summer 1993.

Kant, Immanuel, Critique of Judgement, 1790; translated by Wemer S. Pluhar, Hackett, Indianapolis, 1987.

Kauffman, Stuart, "Antichaos and Adaptation", Scientific American, August 1991.

Kauffman, Stuart, The Origins of Order, Oxford University Press, New York, 1993.

Kelley, Kevin (Ed.), The Home Planet, Addison-Wesley, New York, 1988.

Koestler, Arthur, The Ghost in the Machine, Hutchinson, London, 1967.

Konigswieser, Roswita, and Christian Lutz (Eds.), Das Systemisch Evolutionare Management, Orac, Vienna, 1992.

Kuhn, Thomas S., The Structure of Scientific Revolutions, University of Chicago Press, 1962.

Laszlo, Ervin, Evolution, Shambala, Boston, 1987.

Lilienfeld, Robert, The Rise of Systems Theory, John Wiley, New York, 1978.

Lincoln, R.J. et al., A Dictionary of Ecology, Cambridge University Press,

1982.

Lorenz, Edward N., "Deterministic Nonperiodic Flow", *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol.20, pp.130-41,1963.

Lovelock, James, "Gaia as seen through the atmosphere", *Atmospheric Environment*, Vol.6, p.579,1972.

Lovelock, James, *Gaia*, Oxford University Press, 1979.

Lovelock, James, *Healing Gaia*, Harmony Books, New York, 1991.

Lovelock, James, and Lynn Margulis, "Biological Modulation of the Earth's Atmosphere", *Icarus*, Vol.21, 1974.

Luhmann, Niklas," *The Autopoiesis of Social Systems*", in Niklas Luhmann, *Essays on Self-Reference*, Columbia University Press, New York, 1990.

Luisi, Pier Luigi, and Francisco J. Varela, "Self-Replicating Micelles — A Chemical Version of a Minimal Autopoietic System", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 19,633-43,1989.

Macy, Joanna, *World As Lover, World As Self*, Parallax Press, Berkeley, Cal., 1991.

Mandelbrot, Benoit, *The Fractal Geometry of Nature*, Freeman, New York, 1983; first French edition published in 1975.

Mander, Jerry, *In the Absence of the Sacred*, Sierra Club Books, San Francisco, 1991.

Maren-Grisebach, Manon, *Philosophie der Gruenen*, Olzog, Munchen, 1982.

Margulis, Lynn, "Gaia: The Living Earth", *Dialogue with Fritjof Capra*, *The Elmwood News Letter*, Berkley, California, Vol.5, No.2,1989.

Margulis, Lynn, *Symbiosis in Cell Evolution*, Second Edition, Freeman, San Francisco, 1993.

Margulis, Lynn, "Gaia is a Tough Bitch", in John Brockmann, *The Third Culture*, Simon & Schuster, New York, 1995.

Margulis, Lynn and Dorion Sagan, *Microcosmos*, Summit, New York, 1986.

Margulis, Lynn and Dorion Sagan, *What is Life?*, Simon & Schuster, New York, 1995.

Margulis, Lynn, Karlene Schwartz, and Michael Dolan, *The Illustrated Five Kingdoms*, Harper Collins, New York, 1994.

Mattessich, Richard, "The Systems Approach: Its Variety of Aspects", *General Systems*, Vol.28, pp.29-40, 1983-84.

Maturana, Humberto, "Biology of Cognition", published originally in 1970; reprinted in Maturana and Varela (1980).

Maturana, Humberto," *Reality: The search for objectivity or the quest for a*

compelling argument", Irish Journal of Psychology, Vol.9, pp.25-82,1988.

Maturana, Humberto, and Francisco Varela, "Autopoiesis: The Organisation of the Living", published originally under the title *De Maquinas y Seres Vivos*, Edisional Universitaria, Santiago, Chile, 1972; reprinted in Maturana and Varela (1980).

Maturana, Humberto, and Francisco Varela, *Autopoiesis and Cognition*, D. Reidel, Dordrecht, Holland, 1980.

Maturana, Humberto, and Francisco Varela, *The Tree of Knowledge*, Shambala, Boston, 1987.

Mayurama, Magoroh, "The Second Cybernetics", *American Scientist*, Vol.51, pp. 164-79,1963.

McCulloch Warren S. and Walter H. Pitts, "A logical calculus of the ideas immanant in nervous activity", *Bull. of Math. Biophysics*, Vol.5, p.1 15,1943.

Mingers, John, *Self-Producing Systems*, Plenum, New York, 1995.

Merchant, Carolyn, *The Death of Nature*, Harper & Row, New York, 1980.

Merchant, Carolyn (Ed.), *Ecology*, Humanities Press, New Jersey, 1994.

Mosekilde, Erik, Javier Aracil, and Peter M. Allen, "Instabilities and chaos in nonlinear dynamic systems", *System Dynamics Review*, Vol.4, pp. 14-55,1988.

Neumann, John von, *Theory of Self-Reproducing Automata*, edited and completed by Arthur W. Burks, University of Illinois Press, 1966.

Noble, Douglas D. (1993), "The regime of technology in education", in *Holistic Education Review*, 1993.

Odum, Eugene, *Fundamentals of Ecology*, Saunders, Philadelphia, 1953.

Orr, David, *Ecological Literacy*, State University of New York Press, 1992.

Paslack, Rainer, *Urgeschichte der Selbstorganisation*. Vieweg, Braunschweig, Germany, 1991.

Patten, B.C., "Network Ecology", in M. Higashi, and T.P. Burns, *theoretical studies of ecosystems: the network perspective*, Cambridge University Press, New York, 1991.

Peitgen, Heinz-Otto, and Peter Richter, *The Beauty of Fractals*, Springer, New York, 1986.

Peitgen, Heinz-Otto, Hartmut Jurgens, Dietmar Saupe, and C. Zuhlten, "Fractals: An Animated Discussion", VHS/Color/63 Minutes, Freeman, New York, 1990.

Pert, Candace, Michael Ruff, Richard Weber, and Miles Herkenham, "Neuropeptides and Their Receptors: A Psychomatic Network", *The Journal of Immunology*, Vol.135, pp.820-26,1985.

Pert, Candace, Presentation at Elmwood Symposium, "Healing Ourselves

and Our Society", Boston, December 9, 1989 (unpublished).

Pert, Candace, "Peptide T: A New Therapy for AIDS", Elmwood Symposium with Candace Pert, San Francisco, November 5, 1992 (unpublished); audiotapes available from Advanced Peptides Inc.

Pert, Candace, "The Chemical Communicators", interview in Bill Moyers, *Healing at the Mind*, Doubleday, 1993.

Pert, Candace, "Neuropeptides, AIDS, and the Science of Mind-Body Healing", interview in *Alternative Therapies*, Vol.1 ,No.3, 1995.

Postman, Neil, *Technopoly*, Knopf, New York, 1992.

Prigogine, Ilya, "Dissipative structures in chemical systems", in Claessons (ed.), *Fast Reaction and Primary Processes in Chemical Kinetics*, New York, 1967.

Prigogine, Ilya, *From Being to Becoming*, Freeman, San Francisco, 1980.

Prigogine, Ilya, "The Philosophy of Instability", *Futures* 21,4, pp.396-400, 1989.

Prigogine, Ilya, and Paul Glansdorff, *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*, New York, 1971.

Prigogine, Ilya, and Isabelle Stengers, *Order out of Chaos*, Bantam, New York, 1984.

Revonsuo, Antti, and Matti Kamppinen (Ed.), *Consciousness in Philosophy and Cognitive Neuroscience*, Lawrence Erlbaum, Hillsdale, New Jersey, 1994.

Ricklefs, Robert E., *Ecology*, third edition, Freeman, New York, 1990.

Roszak, Theodore, *The Voice of the Earth*, Simon & Schuster, NY, 1992.

Roszak, Theodore, *The Cult of Information*, UC Press, Berkeley, 1994.

Sachs, Aaron, "Humboldt's Legacy and the Restoration of Science", *World Watch*, **March/April 1995**.

Schmidt, Siegfried (Ed.), *Der Diskurs des Radikalen Konstruktivismus*, Suhrkamp, **Frankfurt, Germany**, 1987.

Schneider, Stephen, and Penelope Boston (Eds.), *Scientist on Gaia*, MIT Press, 1991.

Sheldrake, Rupert, *A New Science of Life*, Tarcher, Los Angeles, 1981.

Sloan, Douglas, (Ed.), *The Computer in Education: A Critical Perspective*. Teacher **College Press**, **New York**, 1985.

Spetnak, Charlene, *Lost Goddesses of Early Greece*, Moon Boob, 1978.

Spetnak, Charlene, "An Introduction to Ecofeminism", *Bucknell Review*, (???), 1993.

Stewart, Ian, *Does God Play Dice?*, Blackwell, Cambridge, Mass., 1989.

Thomas, Lewis, *The Lives of a Cell*, Bantam, New York, 1975.

tfodcull, Jakob von, *Umwelt und Innenwelt der Tiere*, Springer, Berlin, 1909.

Ulrich, Hans, *Management*, Haupt, Bern, Switzerland, 1984.

Varela, Francisco, "Describing the logic of the living: The adequacy and limitations of the idea of autopoiesis", in Milan Zeleny (Ed.), *Autopoiesis: A Theory of Living Organisation*, North Holland, New York, 1981; pp.36-48.

Varela, Francisco, Humberto Maturana, and Richardo Uribe, "Autopoiesis: the Organisation of Living Systems, its Characterization and a Model", *BioSystems* 5, 187-96, 1974.

Varela, Francisco, and Antonio Coutinho, "Immunoknowledge", in J. Brockman (Ed.), *Doing Science*, Prentice-Hall, New York, 1991a. Varela, Francisco, and Antonio Coutinho, "Second Generation immune networks", *Immunology Today*, Vol. 12, pp. 159-166, 1991b.

Varela, Francisco, Evan Thompson, and Eleanor Rosch, *The Embodied Mind*, MIT Press, Cambridge, Mass., 1991.

Varela, Francisco, "Resonant Cell Assemblies", *Biological Research*, 28, 81—95, 1995.

Vernadsky, Vladimir, *The Biosphere*, published originally in 1926; reprinted U.S. edition by Synergetic Press, Oracle, Arizona, 1986.

Walde, Peter, Roger Wick, Massimo Fresta, Annarosa Mangone, and Piere Luigi Luisi, "Autopoietic Self-Reproduction of Fatty Acid Vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, 116, 11649-54, 1994.

Webster, G., and B.C. Goodwin, "The origin of species: a structural approach", *Journal of Social and Biological Structures*, Vol.5, pp.15-47, 1982.

Weizenbaum, Joseph, *Computer Power and Human Reason*, Freeman, New York, 1976.

Weinhandl, Ferdinand (Ed.), *Gestalthaftes Sehen*, Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 1960.

Whitehead, Alfred North, *Process and Reality*, Macmillan, New York, 1929.

Wiener, Norbert, *Cybernetics*, MIT Press, 1948; reprinted 1961.

Wiener, Norbert, *The Human Use of Human Beings*, Houghton Mifflin, New York, 1950.

Windelband, Wilhelm, *A History of Philosophy*, Macmillan, New York, 1901.

Winograd, Terry, and Fernando Flores, *Understanding Computers and Cognition*, Addison-Wesley, New York, 1991.

Yovits, Marshall C and Scott Cameron (Eds.), *Self-Organising Systems*, Pergamon, New York, 1959.

Yovits, Marshall C, George Jacobi, and Gordon Goldstein (Eds.), Self-Organising Systems, Spartan Books, 1962.

www.e-puzzle.ru