**Джеймс Глейк. Хаос. Создание новой науки**

Когда я только размышлял о классификации материалов сайта, то понимал, что темой номер один должен стать системный подход. На мой взгляд, это то, в чем в первую очередь нуждаются современные менеджеры. И мне приятно, что целый ряд публикаций на эту тему пользуется популярностью у посетителей сайта. Среди лидеров следующие заметки:

|  |
| --- |
| [Джозеф О'Коннор. Искусство системного мышления](http://baguzin.ru/wp/?p=881) |
| [Гараедаги. Системное мышление. Как управлять хаосом и сложными процессами](http://baguzin.ru/wp/?p=939) |
| [Нассим Талеб. Черный лебедь. Под знаком непредсказуемости](http://baguzin.ru/wp/?p=1533) |
| [У. Эдвардс Деминг. Выход из кризиса: Новая парадигма управления людьми, системами и процессами](http://baguzin.ru/wp/?p=2138) |
| [Донелла Медоуз. Азбука системного мышления](http://baguzin.ru/wp/?p=3075) |
| [Питер Сенге. Пятая дисциплина. Искусство и практика обучающейся организации](http://baguzin.ru/wp/?p=1200) |
| [Евгений Ксенчук. Системное мышление. Границы ментальных моделей и системное видение мира](http://baguzin.ru/wp/?p=3502) |
| [Закон необходимого разнообразия и его следствие – децентрализация управления](http://baguzin.ru/wp/?p=577) |
| [Обратная связь – основа поддержания и развития](http://baguzin.ru/wp/?p=592) |

Сегодня представляю еще одну книгу на эту тему. В ней популярным языком рассказывается о системной динамике, фракталах, обратных связях, о прорывных идеях в математике, физике, медицине, которые позволили создать новую науку о сложности нашего мира.

Джеймс Глейк. Хаос. Создание новой науки. – СПб.: Амфора, 2001 – 398 с.

![Глейк Д. - Хаос: Создание новой науки [2001, DjVu/fb2/ePub/DOC, RUS]]()

С началом хаоса заканчивается классическая наука. Изучая природные закономерности, физики почему-то пренебрегали хаотическими проявлениями: формированием облаков, турбулентностью в морских течениях, колебаниями численности популяций растений и животных, апериодичностью пиков энцефалограммы мозга или сокращений сердечных мышц. Порождаемые хаосом природные феномены, лишенные регулярности и устойчивости ученые всегда предпочитали оставлять за рамками своих изысканий. Однако, начиная с 1970-х годов некоторые исследователи в США и Европе начинают изучать хаотические явления. Десять лет спустя понятие «хаос» дало название стремительно развивающейся дисциплине, которая перевернула всю современную науку.

Новая наука дала миру особый язык, новые понятия: фрактал, бифуркация, прерывистость, периодичность, аттрактор, сечение фазового пространства. Для некоторых ученых хаос скорее наука переходных процессов, чем теория неизменных состояний, учение о становлении, а не о существовании. Хаос вызывает к жизни вопросы, которые плохо поддаются решению традиционными методами, однако позволяют сделать общие заключения о поведении сложных систем. Все первые теоретики хаоса чувствуют, что поворачивают вспять развитие науки, следовавшей по пути редукционизма – анализа систем как совокупностей составляющих их элементарных объектов: кварков, хромосом, нейронов. Они верят, что *ищут пути к анализу систем как целого*.

По словам одного физика XX-й век будет памятен лишь благодаря созданию теории относительности, квантовой механики и хаоса. Теория относительности развеяла мечту о детерминизме физических событий, а хаос развенчал Лапласову фантазию о полной предопределенности развития систем.

Многие простейшие системы, как оказывается, обладают исключительно сложным и непредсказуемым хаотическим поведением. И все же в подобных системах иногда самопроизвольно возникает порядок, то есть порядок и хаос в них сосуществуют. Лишь новая научная дисциплина могла положить начало преодолению огромного разрыва между знаниями о том, как действует единичный объект – одна молекула воды, одна клеточка сердечной ткани, один нейрон – и как ведет себя миллион таких объектов.

Изучать хаос начали в 1960-х годах, когда ученые осознали, что довольно простые математические уравнения позволяют моделировать системы, столь же неупорядоченные, как самый бурный водопад. Незаметные различия в исходных условиях способны обернуться огромными расхождениями в результатах – подобное называют «сильной зависимостью от начальных условий». Применительно к погоде это выливается в «эффект бабочки»: сегодняшнее трепыхание крыльев мотылька в Пекине через месяц может вызвать ураган в Нью-Йорке.

Составляя «родословную» новой науки, исследователи хаоса обнаруживают в прошлом много предвестий переворота. Однако для молодых физиков и математиков, возглавивших революцию в науке, точкой отсчета стал именно эффект бабочки.

**Глава 1. Эффект бабочки**

*Физикам нравится думать, будто все, что надо сделать, сводится к фразе: вот начальные условия; что случится дальше?
Ричард Ф. Фейнман*

В 1960-м году Лоренц создал мини-модель погоды, которая привела в восторг его коллег. Он выбрал двенадцать уравнений, описывающих связь между температурой и атмосферным давлением, а также между давлением и скоростью ветра и применил на практике законы Ньютона

Вот уже два столетия наука об атмосфере ждала появления машины, способной снова и снова производить тысячи вычислений, повинуясь указаниям человека. Лишь компьютер мог доказать, что мир идет по пути детерминизма, что погода подчиняется законам, столь же незыблемым, как и принципы движения планет, наступления солнечных и лунных затмений, морских приливов и отливов.

Когда астроном говорил, что комета Галлея вновь приблизится к Земле через семьдесят шесть лет, это воспринималось как факт, а не как предсказание. Тщательно составленные численные прогнозы, основанные на детерминизме, определяли траектории космических кораблей и ракет. Отсюда следовал вывод: почему бы не рассчитать поведение ветра и облаков?

Вполне понятно стремление исследователей XX-го века – биологов, физиологов, экономистов – разложить свои миры на атомы, подчиняющиеся законам науки. Во всех названных дисциплинах господствовал детерминизм сродни ньютоновскому. Впрочем, существовало одно маленькое «но», изменения никогда не бывают совершенными. Ученые, вставшие под ньютоновские знамена, обычно выдвигают следующий аргумент: имея приблизительные данные о начальном состоянии системы и понимая естественный закон, которому она подчиняется, можно рассчитать ее примерное поведение. Такой подход вытекает из самой философии науки. Один видный теоретик любил подчеркивать в своих лекциях: «Главная идея науки состоит в том, чтобы не обращать внимания на лист, падающий в одном из миров другой галактики, когда вы пытаетесь объяснить движение шарика по бильярдному столу на планете Земля.

Однажды, зимой 1961-го года, намериваясь изучить определенную последовательность событий, Лоренц несколько сократил исследование – приступил к построению не с начальной точки, а с середины. В качестве исходных данных ученый ввел цифры из предыдущей распечатки. Когда он через час вернулся, отдохнув от шума и выпив чашку кофе, то увидел нечто неожиданное, давшее начало новой науке (рис. 1). Новый отрезок должен был полностью повторить предыдущий, ведь Лоренц собственноручно ввел в компьютер числа, и программа оставалась неизменной. Тем не менее, график существенно расходился с ранее полученным. Лоренц посмотрел сначала на один ряд чисел, потом на второй… С таким же успехом он мог наугад выбрать две случайные модели погоды. И первое, о чем он подумал, – вышла из строя вакуумная лампа. Внезапно ученый все понял. Машина работала нормально, а разгадка заключалась в числах, заложенных им в компьютер. Машина могла хранить в памяти шесть цифр после запятой, например …,506127. На распечатку же, в целях экономии места, выдавалось всего три: …,506. Лоренц ввел округленные значения, предположив, что разница в тысячных долях несущественна. Предположение выглядело вполне разумно. Следовало предполагать, что при незначительном отличии начальной точки от введенной ранее модель будет чуть-чуть расходиться с предыдущим вариантом. И все-таки в системе Лоренца малые погрешности оказались катастрофическими.



Рис. 1. Расхождение двух графиков погоды. Эдвард Лоренц заметил, что его программа строит модели, которые, хотя и берут начало примерно в одной точки, все более и более отклоняются друг от друга, и сходство, в конце концов, пропадает (из распечаток Лоренца 1961 г.)

Лоренц понял: долгосрочное прогнозирование погоды обречено.

Эффект бабочки имеет и строгое научное название – «сильная зависимость от начальных условий». Зависимость эту превосходно иллюстрирует детский стишок:

Не было гвоздя – подкова пропала,
Не было подковы – лошадь захромала,
Лошадь захромала – командир убит,
Конница разбита, армия бежит,
Враг вступает в город, пленных не щадя,
От того что в кузнице не было гвоздя.
(Перевод С.Я. Маршака)

Как наука, так и жизнь учит, что цепь событий может иметь критическую точку, в которой небольшие изменения приобретают особую значимость. Суть хаоса в том, что такие точки находятся везде, распространяются повсюду. Лоренц, отложив на время занятия погодой, стал искать более простые способы воспроизведения сложного поведения объектов. Один из них был найден в виде системы из трех нелинейных, то есть выражающих не прямую пропорциональную зависимость, уравнений. Линейные соотношения изображаются прямой линией на графике, и они достаточно просты. Линейные уравнения всегда разрешимы, что делает их подходящими для учебников.

Линейные системы обладают неоспоримым достоинством: можно рассматривать отдельные уравнения как порознь, так и вместе. Нелинейные системы в общем виде не могут быть решены. Рассматривая жидкостные и механические системы, специалисты обычно стараются исключить нелинейные элементы, к примеру, трение. Если пренебречь им, можно получить простую линейную зависимость между ускорением шайбы и силой, придающей ей это ускорение. Приняв в расчет трение, мы усложним формулу, поскольку сила будем меняться в зависимости от скорости движения шайбы. Из-за этой сложной изменчивости рассчитать нелинейность весьма непросто. Вместе с тем, она порождает многообразные виды поведения объектов, не наблюдаемые в линейных системах.

Особый вид движения жидкости породил три уравнения Лоренца, которые описывают течение газа или жидкости, известное как конвекция. В атмосфере конвекция как бы перемешивает воздух, нагретый при соприкосновении с теплой почвой. Системой, вполне точно описываемой уравнениями Лоренца, является водяное колесо определенного типа, механический аналог вращающихся конвенционных кругов (рис. 2). Вода постоянно льется с вершины колеса в емкости, закрепленные на его ободе, а из каждой емкости она вытекает через небольшое отверстие. В том случае, когда поток воды мал, верхние емкости заполняются недостаточно быстро для преодоления трения. Если же скорость водяной струи велика, колесо начинает поворачиваться под воздействием веса жидкости и вращение становится непрерывным. Однако, коль скоро струя сильна, черпаки, полные воды, некоторое время колеблются внизу, а затем начинают стремиться в другую сторону, таким образом, замедляя движение, а затем останавливая колесо; и в дальнейшем оно меняет направление движения на противоположное, поворачиваясь сначала по часовой стрелке, а потом – против нее.



Рис. 2. Водяное колесо Лоренца. Первая хаотическая система, обнаруженная Эдвардом Лоренцем

Интуиция подсказала Лоренцу, что за длительный период времени при неизменном потоке воды система обретет устойчивое состояние. Колесо будет или равномерно вращаться, или постоянно колебаться в двух противоположных направлениях, покачиваясь через определенные неизменные промежутки времени сначала вперед, затем назад. Но Лоренц обнаружил еще одно обстоятельство. Три уравнения с тремя переменными полностью описывали движение данной системы. Компьютер ученого распечатал меняющиеся значения этих переменных в следующем виде: 0-10-0; 4-12-0; 9-20-0; 16-36-2; 30-66-7; 54-115-24; 93-192-74. Числа в наборе сначала увеличивались, затем уменьшались по мере отсчета временных интервалов: пять, сто, тысяча...

Чтобы наглядно изобразить полученные результаты, Лоренц использовал каждый набор из трех чисел в качестве координаты точки в трехмерном пространстве. Таким образом, последовательность чисел воспроизводила последовательность точек, образующих непрерывную линию, которая фиксировала поведение системы. Эта линия должна была, начиная с определенной точки, расположиться параллельно осям координат, что означало бы достижение системой устойчивости при стабилизации скорости и температуры. Был возможен и второй вариант — формирование петли, повторяющейся вновь и вновь и сигнализирующей о переходе системы в периодически повторяющееся состояние.

Но Лоренц не обнаружил ни того ни другого. Вместо ожидаемого эффекта появилось нечто бесконечно запутанное, всегда расположенное в определенных границах, но никогда не повторявшееся. Изгибы линии приобретали странные, весьма характерные очертания, что-то похожее на два крыла бабочки или на двойную спираль в трехмерном пространстве (рис. 3). И эта форма свидетельствовала о полной неупорядоченности, поскольку ни одна из точек или их комбинаций не повторялась. В течение многих лет ни один феномен не изображался столь бессчетное количество раз, ни об одном не сняли столько фильмов, сколько о таинственной кривой — двойной спирали, известной как «аттрактор Лоренца». Она воплощала в себе сложность и запутанность, все многообразие хаоса.



Рис. 3. Аттрактор Лоренца. Это изображение (внизу), напоминающее крылья бабочки, стало эмблемой первых исследователей хаоса. Оно раскрывает тонкую структуру, таящуюся в беспорядочном потоке информации. Изменение значений любой переменной может быть показано графически в зависимости от времени (вверху слева). Чтобы продемонстрировать меняющееся соотношение между тремя переменными, достаточно предположить, что в каждый момент времени три переменных фиксируют нахождение точки в трехмерном пространстве; по мере изменения системы перемещение точки описывает непрерывную линию. Поскольку состояние системы никогда точно не повторяется, траектория не пересекает сама себя, образуя лишь новые и новые петли. Движение в аттракторе абстрактно, тем не менее, оно передаст особенности движения реальных систем. Например, переход от одного из «крыльев» аттрактора к другому соответствует началу обратного хода водяного колеса или изменению направления вращения жидкости при конвекции.

**Глава 2. Переворот**

*Конечно, нужно напрячься, чтобы выйти за границы того,
что называют статистикой.
Стивен Спендер*

Историк науки Томас Кун рассказывает о занимательном эксперименте, проведенном двумя психологами в 1940-х годах (подробнее см. [Томас Кун. Структура научных революций](http://baguzin.ru/wp/?p=4385)). Испытуемым предоставляли немного времени, чтобы взглянуть на игральные карты (причем в каждый временной промежуток показывали лишь одну карту), а затем просили описать увиденное. Хитрость заключалась в том, что некоторые из карт были особенными; например, шестерка пик имела красную масть, а дама бубен – черную. Пока испытуемым давали совсем мало времени, чтобы разглядеть карты, все шло как по маслу. Ответ на вопрос следовал незамедлительно, и люди совершенно не замечали уловок экспериментаторов. Посмотрев на красную шестерку пик, они определяли ее как шестерку червей или шестерку пик. Когда же время демонстрации карт увеличили, испытуемые засомневались. Им стало понятно, что с картами что-то не так, но что именно – они сообразить не могли. Как правило, они отвечали, что видели нечто странное, что-то вроде черного сердца с красной каймой.

Профессиональные исследователи, схватывающие смутные, быстро мелькающие картины жизни природы, не отличаются особой уязвимостью, не поддаются страданиям и смятению, сталкиваясь лицом к лицу со странным. Помеченные ученым странности, меняя представление об объекте, двигают вперед науку. Нечто подобное, с точки зрения Куна, происходит и с историей хаоса.

Кун весьма скептически отзывался о традиционных воззрениях на науку, о том, что прогресс в этой области якобы совершается за счет накопления знаний, дополнения старых открытий новыми, возникновения новых теорий под влиянием вскрытых экспериментальных фактов. Он опровергал представление о науке как об упорядоченном процессе поиска ответов на заданные вопросы, подчеркивая разницу между тем, что предпринимают ученые при исследовании вполне уместных и ясно очерченных вопросов внутри своих дисциплин, и исключительным, неординарным мышлением, порождающим революции.

Но случаются и перевороты, когда из пепла отжившей, загнавшей себя в тупик науки восстает новая. Зачастую такая революция носит междисциплинарный характер – важнейшие открытия нередко делаются исследователями, переступившими границы своей науки. Поверхностные идеи усваиваются легко; но те, что требуют переменить взгляд на мир, вызывают враждебность. Джозеф Форд, физик из Технологического института Джорджии, нашел подтверждение этому у Толстого: «Я уверен, что большинство людей, в том числе и те, что свободно чувствуют себя, разрешая чрезвычайной трудности вопросы, редко могут принять даже самую простую и очевидную истину, если она обяжет их согласиться с ложностью результатов своей работы – выводов, с восторгом представленных в свое время коллегам, с гордостью описанных слушателям, вплетенных нить за нитью в жизнь самих их создателей».

К началу XX-го века диссипативные[[1]](#footnote-1) процессы, к примеру, трение, были уже изучены и учитывались в уравнениях. На занятиях студентам рассказывали, что нелинейные системы, как правило, не имеют решения, и это вполне соответствовало истине.

Возникновение топологии и теории динамических систем восходит еще ко временам [Анри Пуанкаре](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%83%D0%B0%D0%BD%D0%BA%D0%B0%D1%80%D0%B5%2C_%D0%90%D0%BD%D1%80%D0%B8), который считал эти дисциплины двумя сторонами одной медали. На рубеже веков Пуанкаре, последним из великих математиков, применил геометрию для описания законов в физической Вселенной. Пуанкаре раньше всех осознал проблему хаоса. Его работы содержат смутные указания на возможную непредсказуемость, столь же трудноуловимую, как и в исследованиях Лоренца.

Хаос и неустойчивость – вовсе не синонимы. Хаотичная система вполне может демонстрировать устойчивость, если определенное ее иррегулярное качество продолжает существовать вопреки незначительным помехам, о чем наглядно свидетельствовала система Лоренца ([Смэйл](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BC%D1%8D%D0%B9%D0%BB%2C_%D0%A1%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D0%BD) услышит о ней лишь годы спустя). Открытый Лоренцем хаос при всей своей непредсказуемости являлся столь же устойчивым, как шарик в лунке. Можно добавить шум в эту систему, покачать, хорошенько разболтать ее, помешать движению внутри нее – все равно, когда возмущение уляжется и мимолетные факторы исчезнут, система вновь вернется к своему прежнему беспорядочному состоянию. Локально она непредсказуема, глобально – устойчива. Реальные же динамические системы вели себя, повинуясь куда более сложному набору правил, чем можно вообразить.

Подкова Смэйла (рис. 4) стала первой в ряду новых геометрических форм, благодаря которым математики и физики многое узнали о движении. Это изобретение – детище топологии, а не физики – казалось несколько искусственным для прикладных целей, однако оно служило отправным пунктом для дальнейших изысканий.



Рис. 4. Подкова Смэйла. Такая топологическая трансформация заложила весьма простую основу толкования хаотичных свойств динамических систем: пространство растягивается в одном направлении, сжимается в другом, а затем перегибается. При повторении операции образуется нечто вроде структурированного беспорядка, подобного тому, который мы получаем, сворачивая пирожные из слоеного теста. *Две точки, оказавшиеся рядом в конце преобразований, вначале могли находиться далеко друг от друга.*

**Глава 3. Взлеты и падения жизни**

Биологи XX-го века, обратившись к математике, создали новую дисциплину – экологию, которая, абстрагируясь от реальной жизни сообществ животных и растений, стала рассматривать их как динамические системы. Биология популяций выяснила кое-что об истории возникновения жизни, об отношении хищников и их жертв, о том, как влияет изменение плотности населения в регионе на распространение болезни. Если математическая модель показывала, как процесс развивается, достигает равновесия или затухает, экологи могли представить себе обстоятельства, при которых вероятны подобные события.

В мальтузианской схеме неограниченного увеличения численности популяции значение линейной функции роста всегда будет увеличиваться. Схема же, более приближенная к жизни, должна включать в себя особый фактор, сдерживающий рост, если популяция уже и так велика.

Говорят, что идеи Лоренца по-настоящему открыл Джеймс Йорк и он же дал науке о хаосе ее нынешнее имя. Вторая часть этого утверждения справедлива. Ознакомившись со статьей Лоренца, которая ждала своего часа, Йорк увидел, что подобное поймут и физики. Он направил копию Смэйлу, проставив на видном месте свой адрес, чтобы получить статью обратно.

Смэйл изумился, обнаружив, что безвестный метеоролог десятью годами раньше обнаружил ту неупорядоченность, которую он сам посчитал однажды математически невероятной. И, сняв множество копий со статьи, Смэйл положил тем самым начало легенде об открытии Йорком работы Лоренца – ведь на каждой копии, появившейся в Беркли и других местах, стоял адрес Йорка. Йорк же чувствовал, что физиков учили не видеть хаос. Между тем в повседневной жизни замеченная Лоренцем «сильная зависимость от начальных условий» таится всюду. Йорк понял, беспорядок существует. Физики и математики стремятся обнаружить некую упорядоченность. «Какой прок в хаосе?» – говорят они. Однако ученые должны знать хаос, потому что неизбежно столкнутся с ним.

Почему инвесторы настаивают на существовании цикличности в колебаниях цен на драгоценные металлы? Да потому, что периодичность – наиболее сложное упорядоченное поведение, которое они могут себе представить. Глядя на биржевые сводки, они ищут в скачках курса некий порядок.

Йорк решил донести до физиков то, чего они не разглядели в работах Лоренца и Смэйла. Он написал статью для самого популярного научного издания их тех, где ее могли бы опубликовать, – для «Американского математического ежемесячника». Работа Йорка сыграла свою роль, однако, в конечном счете, самой замечательной ее частью стал интригующий заголовок: «Период с тремя волнами заключает в себе хаос».

Йорк продемонстрировал физикам, что хаос вездесущ, стабилен и структурирован. Он дал повод поверить в то, что сложные системы, традиционно сводившиеся к трудным для решения дифференциальным уравнениям, могли быть описаны с помощью довольно простых графиков.

Советские математики и физики уже давно и упорно пытались постичь природу хаоса, начало этому положили еще работы А.Н. Колмогорова 50-х годов. Более того, советские специалисты, как правило, действовали вместе, что помогало представителям двух дисциплин преодолеть разногласия, столь частые в научной среде других стран.

Чем дольше Мэй рассматривал биологические системы сквозь призму простых хаотических моделей, тем больше он видел моментов, противоречащих общепринятым представлениям (рис. 5). Например, эпидемиологи хорошо знают, что массовые вспышки заболеваний появляются, как правило, с определенной цикличностью – регулярно или иррегулярно. Корь, полиомиелит, краснуха идут в наступление и отступают периодически. Мэй осознал, что колебания могли воспроизводиться нелинейной моделью, и заинтересовался тем, что случится, если система получит внезапный толчок – помеху, вроде массовой вакцинации. Казалось бы, процесс должен плавно изменяться в желаемом направлении. На самом деле, как обнаружил Мэй, начнутся весьма ощутимые колебания.



Рис. 5. Удвоение периодов и хаос. Разветвленная диаграмма Роберта Мэя, построенная на основе уравнения *хc = rx(1 – x)*, где *хc* – размер популяции, *r* – параметр. Показано, каким образом изменение параметра (*r*) — способности живущей в естественных условиях популяции к снижению и увеличению числа составляющих ее особей – повлияет на поведение системы в целом (*хc*). Значения параметра откладываются слева направо по горизонтальной оси; значения численности популяции — по вертикальной. Рост параметра знаменует перегрузку системы, увеличение в ней нелинейного элемента. Когда это значение невелико (слева), популяция угасает. По мере его роста (в центре) популяция достигает равновесия. При дальнейшем увеличении параметра, равновесное состояние расщепляется на две ветви. Начинаются колебания численности популяции между двумя различными уровнями. Расщепления, или разветвления, происходят все быстрее и быстрее. Далее система становится хаотичной (справа), и численность особей может приобретать бесконечное множество значений.

**Глава 4. Геометрия природы**

Бенуа Мандельброт довольно долго и скрупулезно создавал свою мысленную картину мира. В 1960-м году она представляла собой лишь смутный, расплывчатый образ, слабый намек на законченную идею. Однако, увидев ее на доске в офисе Хендрика Хаутхаккера, Мандельброт сразу узнал то, что вынашивал годами. Мандельброт занимался экономикой – изучал распределение крупных и малых доходов в финансовой сфере. «Как здесь оказалась моя диаграмма? – изумился Мандельброт, пряча досаду. – Это что, материализация идей?» Профессор, однако, не мог взять в толк, о чем говорит гость. Диаграмма не имела ничего общего с распределением доходов – она отражала изменение цен на хлопок за последние восемь лет.

Впрочем, и сам Хаутхаккер усматривал нечто странное в своем графике: наблюдалось слишком много больших скачков. Вероятность подобных событий падала не слишком быстро, и функция, описывающая ее, имела длинный «хвост», в то время, как стандартной моделью указанных вариаций всегда являлась колоколообразная кривая. Построенный Хаутхаккером график никак не желал принимать форму функции нормального распределения. Вместо этого кривая ценовых изменений приобретала очертания, которые Мандельброт начал распознавать в графиках удивительно далеких, несопоставимых друг с другом явлений. В нем крепло убеждение, что течение случайных, стохастических процессов подчиняется особым законам.

Хотя экономисты не многого добились в анализе товарных или биржевых цен, это отнюдь не означало, что не существует фундаментальных теорий ценообразования. Напротив, многие были убеждены, что небольшие случайные скачки цен не имеют ничего общего с долговременными ценовыми тенденциями. С одной стороны – мельтешня, с другой – сигналы долгосрочных изменений. Так получилось, что в картине мира по Мандельброту не нашлось места дихотомии. Вместо того чтобы отделить небольшие изменения от ощутимых, воображение свело их воедино. Ученый не отдавал предпочтения ни мелкому, ни крупному масштабу, ни дням, ни десятилетиям – его интересовала целостная картина. Он весьма отдаленно представлял, как передать на бумаге то, что рисовалось ему в мыслях, однако верил, что во всем происходящем должна присутствовать некоторая симметрия – даже не правого и левого, верхнего и нижнего, а скорее симметрия крупных и мелких масштабов. И действительно, когда Мандельброт на компьютере проанализировал информацию об изменении цен на хлопок, ожидаемые им потрясающие результаты не заставили себя ждать. Точки, которые не желали ложиться на кривую нормального распределения, обнаруживали странную симметрию, иначе говоря, каждый отдельно взятый скачок цены был случайным и непредсказуемым, однако последовательность таких изменений не зависела от масштаба. Кривые, изображавшие дневные скачки, и те, что воспроизводили месячную динамику, прекрасно соответствовали друг другу (подробнее см. [Бенуа Мандельброт. (Не)послушные рынки: фрактальная революция в финансах](http://baguzin.ru/wp/?p=1604)).

Внутри самых, казалось бы, хаотичных нагромождений информации скрывался поразительный порядок. Поразительный настолько, что Мандельброт задавался вопросом: какой еще закон сохранил бы свою силу, будь он приложен к столь произвольной выборке данных? Почему одна и та же закономерность оказывается одинаково справедлива и для распределения доходов, и для динамики цен на текстильное сырье? В теории хаоса Мандельброт проложил себе особый путь, ибо несмотря ни на что формировавшийся в его мозгу образ реальности превратился в начале 60-х годов из причудливой картинки в полноценное геометрическое построение. Для физиков, развивавших идеи ученых вроде Лоренца, Смэйла, Йорка и Мэя, этот «колючий» математик был досадной помехой, но предложенные им методы и язык исследований составили неотъемлемую часть зарождавшейся науки.

Ни разу за тридцать лет, выведших Мандельброта из тени безвестности к славе, ни одна его работа не была принята всерьез представителями тех дисциплин, которыми он занимался. Даже математики, не злословя открыто, замечали, что кем бы ни был Мандельброт, он не их поля ягода. Находя вдохновение в малоизвестных фактах малоизученных областей истории науки, ученый медленно нащупывал собственный путь.

В самом начале работы на IBM, Мандельброт столкнулся с практической задачей, в решении которой был весьма заинтересован его патрон. Инженеров корпорации ставила в тупик проблема шума в телефонных линиях, используемых для передачи информации от одной вычислительной машины к другой. Электрический ток несет информацию в виде импульсов. Инженеры прекрасно понимали, что влияние помех будет тем меньше, чем выше мощность сигнала, однако некий самопроизвольный шум никак не удавалось свести на нет.

Сделанные Мандельбротом выводы подсказали, что увеличивать силу сигнала в целях устранения большего количества шумов бесполезно. Разумнее остановить выбор на сравнительно слаботочной связи, смириться с неизбежностью погрешностей и использовать стратегию дублирования сигналов для исправления ошибки. Благодаря Мандельброту инженеры корпорации изменили свои взгляды на причину шумов: раньше внезапное появление помех списывали на то, что где-то техник орудует отверткой, но построенная ученым модель доказала, что нельзя объяснять природу помех специфичными локальными явлениями.

Затем воображение Мандельброта захватила информация, почерпнутая из гидрографии, точнее – из истории Нила. Египтяне тысячелетиями наблюдали и фиксировали уровень вод и делали это совсем не из праздного любопытства, а для оценки будущего урожая и определения будущих налогов. Уровень вод великой реи варьировался чрезвычайно резко: в иные годы он поднимался довольно высоко, в другие могучий поток мелел. Мандельброт классифицировал данные о таких измерениях. Он выделил два типа эффектов, наблюдаемых также и в экономике, и назвал их эффектами Ноя и Иосифа. Эффект Ноя, или скачок, обозначает отсутствие последовательности, иначе говоря, разрыв: количественная величина может изменяться сколь угодно быстро. Экономисты полагали, что цены меняются довольно плавно в том смысле, что проходят – быстро или медленно – через все уровни, лежащие на пути от одной точки к другой. Этот образ движения, заимствованный из физики, был ложным: цены могут совершать мгновенные скачки, сменяющие друг друга с той же быстротой, с какой мелькают новости на ленте телетайпа и брокеры просчитывают в ум выгоды от возможной сделки. Мандельброт утверждал, что стратегия фондовой биржи обречена на провал, если определенные акции надо продать за 50 долларов, пока цена бумаг снижается с 60 до 10 долларов. Эффект Иосифа символизирует непрерывность. Наступят семь плодородных лет на земле египетской, и придут после них семь лет голода. Периодичность, если именно о ней идет речь в библейской легенде, понимается чересчур упрощенно, однако периоды наводнений и периоды засухи действительно настают вновь и вновь, чередуясь друг с другом.

Мандельброт двигался от целочисленных размерностей 0,1,2,3,… к тому, что казалось невозможным, – к дробным измерениям. Дробное измерение позволяет вычислять характеристики, которые не могут быть четко определены иным путем: степени неровности, прерывистости или неустойчивости какого-либо объекта. Например, извилистая береговая линия, несмотря на неизмеримость ее «длины», обладает присущей только ей шероховатостью. Мандельброт указал пути расчета дробных измерений объектов окружающей действительности. Создавая свою геометрию, он выдвинул закон о неупорядоченных формах, что встречаются в природе. Закон гласил: степень нестабильности постоянна при различных масштабах.

Мандельброт придумал термин fractal (фрактал), который вошел как существительное и прилагательное в современный английский и французский языки. Фрактал позволяет вообразить бесконечность. Представьте себе равносторонний треугольник с длиной стороны в один фут. А теперь мысленно проделайте следующую несложную трансформацию: выделите на каждой стороне треугольника среднюю треть и приставьте к ней равносторонний треугольник, длина стороны которого составляет одну треть от длины стороны исходной фигуры (рис. 6). Повторите операцию. Если проделывать эту процедуру вновь и вновь, число деталей в образуемом контуре будет расти и расти. Изображение приобретает вид снежинки с геометрически идеальными очертаниями. Оно известно как кривая Коха. Связная кривая, составленная из прямых или криволинейных участков, названа по имени шведского математика Хельга фон Коха, впервые описавшего подобный феномен в 1904-м году.



Рис. 6. Снежинка Коха. «Приблизительная, но весьма удачная модель береговой линии» — так охарактеризовал ее Мандельброт. Чтобы создать подобную конструкцию, начнем с построения треугольника, каждая сторона которого равна единице. В середину каждой стороны встроим новый треугольник, уменьшенный в три раза, и повторим преобразования многократно. Длина контура полученной фигуры равна 3 \* 4/3 \* 4/3 \* 4/3... и так далее до бесконечности. Однако ее площадь все же меньше площади окружности, описанной около первоначального треугольник. Таким образом, бесконечно длинная линия очерчивает ограниченную площадь.

Очень трудно постичь всю сложность бесконечности, внедряющейся в самое себя. Фрактальное измерение оказалось замечательным инструментом. В известном смысле степень неровности определяла способность того или иного объекта занять определенное пространство. Обычная Евклидова одномерная прямая в этом не нуждается, чего нельзя сказать о контуре кривой Коха, бесконечная длина которого теснится в ограниченном пространстве. Сама кривая являет собой уже нечто большее, чем просто линия, но все же это еще и не плоскость; она глубже одномерного объекта, но не дотягивает до двухмерной формы. Используя технику, созданную математиками в начале XX-го века, но потом почти забытую, Мандельброт смог вполне точно описать фрактальное измерение. Для кривой Коха, например, бесконечное умножение на 4/3 дает размерность 1,2618.

Продолжая следовать этим путем, Мандельброт, по сравнению с другими математиками, пользовался двумя преимуществами. Во-первых, он имел доступ к вычислительной технике корпорации IBM. Другим преимуществом Мандельброта стала картина реальности, которую он начал выстраивать, столкнувшись с флуктуациями цен на хлопок, шумов при передаче сигналов, разливов рек. Картина эта начала приобретать отчетливость. Исследование образцов неупорядоченности в естественных процессах и анализ бесконечно сложных форм пересекались, и точкой пересечения послужило так называемое внутреннее подобие: «фрактальный» – это, прежде всего, «внутренне подобный». Внутреннее подобие представляет собой симметрию, проходящую сквозь масштабы, повторение большого в малом. Таблицы Мандельброта, отражавшие изменения во времени цен и уровня рек, обнаруживали подобие, поскольку не только воспроизводили одну и ту же деталь во все более малых масштабах, но и генерировали ее с определенными постоянными измерениями. Чудовищные формы вроде кривой Коха являлись внутренне подобными потому, что выглядели одинаково даже при большом увеличении.

Кристофер Шольц, профессор Колумбийского университета, специализировавшийся на изучении формы и строения твердого вещества Земли, впервые задумался о таком явлении, как фракталы. Фрактальные изображения нашли применение в целом ряде областей, связанных со свойствами контактирующих поверхностей. Один из простых, но весьма важных постулатов фрактальной геометрии состоит в том, что контактирующие поверхности соприкасаются далеко не везде, – соприкосновению препятствует их бугристость, прослеживаемая в любом масштабе. Даже в скале, подвергнувшейся огромному давлению, при достаточно большом увеличении можно заметить крошечные промежутки, сквозь которые просачивается жидкость (Шольц назвал это «эффектом Шалтая-Болтая»). Именно поэтому никому никогда не удается соединить осколки разбитой чашки. Даже если они, на первый взгляд, совпадают, при большем увеличении становится видно, что беспорядочно расположенные бугорки просто не сходятся. В своей области Шольц стал известен как один из немногих, кто принял на вооружение технику фрактальных измерений.

Шольц не желал отказываться от арсенала фрактальной геометрии. «Это единственная модель, которая позволит нам справиться с множеством меняющихся измерений земного шара, обеспечив математическим и геометрическим инструментарием для их описания и даже предсказания, – утверждал он. – Однажды, преодолев препятствие и вникнув в парадигму, мы сможем изменять объекты и по-новому воспринимать известные явления. Мы просто взглянем на них по-иному, словно обретя другое зрение, гораздо шире того, что имели раньше».

Представьте, что человек стал вдвое больше обычного, но сохранил те же пропорции, – кости его просто разрушатся под тяжестью возросшей массы тела. Следовательно, масштаб очень важен. С другой стороны, раздел физической науки, имеющий дело с подземными толчками, почти не связан с масштабом. Землетрясение большой силы – то же малое, только в увеличенном масштабе. Облака, подобно землетрясениям, могут быть сведены к определенному масштабу. Характерная для них беспорядочность – ее вполне можно описать в терминах фрактального измерения – совсем не меняется при изменении масштаба. Вот почему, путешествуя по воздуху, совсем не ощущаешь, насколько далеко от тебя находится то или иное облако. Даже в ясную погоду облако, проплывающее в двадцати футах от наблюдателя, может быть неотличимо от того, что находится на расстоянии в сотню раз большем. Анализ снимков, полученных со спутников, показал инвариантное фрактальное измерение облаков, наблюдаемых на расстоянии сотен миль. Довольно сложно отделаться от привычки рассматривать явления, прежде всего с точки зрения их размера и продолжительности. Однако фрактальная геометрия утверждает, что при исследовании некоторых фрагментов окружающего мира поиски присущего лишь им масштаба только отвлекают от сути.

Уравнения, описывающие потоки жидкости, во многих случаях применяются без оглядки на масштаб. Кровеносные сосуды, начиная от аорты и заканчивая капиллярами, образуют сплошную среду иного типа. Многократно разветвляясь и делясь, они становятся столь узкими, что площадь их поперечного сечения оказывается сравнимой с размерами кровяной клетки. И такие разветвления имеют фрактальную природу, напоминая своей структурой один из уродливых объектов, придуманных математиками под эгидой Мандельброта. В силу физиологической необходимости кровеносные сосуды приобрели просто удивительные свойства. Подобно тому, как кривая Коха «сжимает» бесконечно длинную линию в ограниченное пространство, в системе кровообращения поверхность с огромной площадью должна вместиться в ограниченный объем. Из всех ресурсов человеческого тела кровь – один из самых дорогих, и поэтому пространство ценится на вес золота. Используя возможности фрактальных структур, природа столь эффективно сконструировала человеческих организм, что в большинстве тканей каждая клетка отделена от кровеносного сосуда не более чем тремя или четырьмя подобными ей. При всем том сами сосуды и циркулирующая по ним кровь занимают совсем небольшое пространство – около 5% объема тела. И все же нельзя взять ни фунта, ни даже миллиметра плоти, не пролив крови.

Легкие также являют пример того, как большая площадь «втиснута» в довольно маленькое пространство. В среднем площадь дыхательной поверхности легких человека больше площади теннисного корта.

В конце концов, термином «фрактал» стали обозначать метод описания, вычисления и рассмотрения множества неупорядоченных и фрагментарных, зазубренных и разъединенных объектов – начиная от кристаллообразных кривых-снежинок и заканчивая прерывистой цепью галактик.

Модели, открытые в начале 70-х годов Робертом Мэем, Джеймсом Йорком и другими учеными, могли быть описана лишь на языке соотносимости больших и малых масштабов. Структуры, отворившие дверь в нелинейную динамику, оказались фрактальными.

На первый взгляд, идея постоянства при изменяющихся масштабах малопродуктивна, отчасти потому, что один из основных научных методов предписывает разбирать предмет исследования на составляющие и изучать мельчайшие частицы. Специалисты, разъединяя объекты, рассматривают порознь их элементы в каждый момент времени. Намереваясь изучить взаимодействие субатомных частиц, они исследуют две или три сразу, что, казалось бы, уже довольно сложно. Однако внутреннее подобие проявляется на гораздо более высоком уровне сложного, а именно поэтому стоит уделить внимание целому.

Невзирая на достижения Смэйла и Мандельброта, именно физики, в конце концов, создали новую науку о хаосе. Мандельброт подарил ей особый язык и множество удивительных изображений природы. Как он сам признавался, его теории описывали лучше, чем объясняли.

**Глава 5. Странные аттракторы**

Проблема турбулентности имеет богатую историю. Все великие физики ломали над ней голову. Плавный поток разбивается на завитки и вихревые токи; беспорядочные изгибы разрушают границы между жидкостью и твердой поверхностью, энергия из крупномасштабного движения быстро перетекает в мелкие завихрения. Почему? Пожалуй, самые разумные идеи предлагали математики, большинство же физиков попросту опасались изучать турбулентность, которая казалась почти недостижимой. Доказательством тому может служить история о Вернере Гейзенберге, известном ученом, занимавшемся квантовой физикой. Последний признавался на смертном одре, что хотел бы задать Господину Богу два вопроса – об основах относительности и о причине турбулентности. «Думаю, что Господь ответит мне на первый из них», – заметил Гейзенберг.

Что же представляет собой турбулентность? Полную неупорядоченность при всех масштабах, крошечные вихри внутри огромных водоворотов. Турбулентность неустойчива и в высшей степени диссипативна, то есть обладает способностью замедлять движение, истощая энергию. Она суть беспорядочное движение. Но, все же, каким образом течение жидкости превращается из плавного в турбулентное? Представьте себе безупречно гладкую полую трубку, в высшей степени стабильный источник водоснабжения, причем вся конструкция надежно защищена от вибрации. А теперь задайте себе вопрос: как же в потоке, текущем внутри трубы, может появиться что-либо беспорядочное?

Фазовое пространство делает возможным превращение чисел в изображения, извлекая даже малую толику существенной информации из движущихся систем, механических или жидкостных, и наглядно демонстрируя все их возможности. Если система представляет собой качающийся маятник, свободный от действия силы трения, то одна из переменных является его положением в пространстве, а другая – скоростью. Они непрерывно меняются, образуя линию из точек, которая изгибается петлей, вновь и вновь повторяющей саму себя. Та же система, но обладающая более высокой энергией, раскачивающаяся быстрее и дальше, образует в фазовом пространстве петлю, схожую с первой, но большую по размерам. Впрочем, столкнувшись с одним из проявлений реальности – трением, система начинает претерпевать изменения. Чтобы описать поведение маятника, подверженного трению, не нужны уравнения движения: каждое его колебание фактически заканчивается на одном и том же месте, в центре, откуда начиналось движение, и скорость его в эти моменты равна нулю. Данная центральная фиксированная зона как бы «притягивает» колебания. Вместо того чтобы вечно чертить на графике петли, орбита маятника спирально закручивается внутрь. Трение рассеивает энергию системы, что в фазовом пространстве выглядит как толчок к центру. Наблюдается движение из внешних зон с высокой энергией к внутренним зонам с низкой энергией. Аттрактор – простейший из возможных – подобен магниту.

Одним из преимуществ рассмотрения состояний системы как совокупности точек в пространстве является то, что система, в которой переменные непрерывно увеличиваются и уменьшаются, превращается в движущуюся точку, словно муха, летающая по комнате. Если некоторые комбинации переменных никогда не возникают, ученый может просто предположить, что пределы комнаты ограничены и насекомое никогда туда не залетит. Ученый, взглянув на фазовую картину, мог, призвав на помощь воображение, уяснить сущность самой системы: петля здесь соответствует периодичности там, конкретный изгиб воплощает определенное изменение, а пустота говорит о физической невероятности.

Давид Руэлль подозревал, что видимые в турбулентном потоке объекты должны отражать то, что объяснялось законами физики, но еще принадлежало к сфере таинственного и неоткрытого. В его понимании рассеивание энергии в турбулентном потоке должно было вести к своеобразному сокращению фазового пространства, притягиванию к аттрактору. Бесспорно, последний не оставался неподвижной точкой, поскольку поток никогда не приходил в состояние покоя, – энергия поступала в систему и уходила из нее. Каким еще мог быть аттрактор? Помимо описанного, согласно догмату, существовал лишь один возможный тип – периодический аттрактор, или замкнутая кривая, орбита, притягивающая все близлежащие орбиты (рис. 7, 8).



Рис. 7. Новый способ изучения маятника. Одна лишь точка у фазовом пространстве (справа) передаст всю информацию о состоянии динамическом системы в конкретный момент времени (слева). Для простого маятника достаточно двух чисел, представляющих его скорость и местоположение. Точки образуют траекторию, которая позволяет наглядно представить непрерывное поведение динамической системы в течение длительного периода времени. Повторяющаяся «петля» отображает систему, которая всегда воспроизводит одно и то же свое состояние. Если повторяющееся поведение устойчиво, как у часов с маятником, система при незначительных помехах возвращается к прежней орбите движения. В фазовом пространстве траектории вблизи орбиты как бы вовлечены в нее, а сама орбита является аттрактором.



Рис. 8. В случае с маятником, непрерывно теряющим энергию на трение (слева показаны затухающие физические колебания), все траектории имеют форму спирали, закручивающейся внутрь, по направлению к точке, в которой система устойчива, — в таком случае движения не наблюдается вообще (справа представлены движения маятника в фазовом пространстве).

В короткий период времени каждая точка фазового пространства может означать возможное поведение динамической системы. При изучении долгосрочной перспективы единственными моделями поведения становятся сами аттракторы. Все иные типы движения преходящи. По определению, аттракторам присуще важнейшее качество – устойчивость.

Однако турбулентность в жидкостях – явление иного порядка, никогда не порождающее единичный ритм. Известное свойство такого явления заключается в том, что в данный момент времени наблюдается весь спектр возможных колебаний. Турбулентность можно сравнить с «белым шумом» или статикой. Могла ли простая детерминистская система уравнений описывать подозрительный феномен? Руэлль и Такенс задались вопросом, обладает ли какой-либо иной тип аттрактора подходящим набором характеристик: устойчивостью, малым числом измерений, непериодичностью.

Какой вид должна иметь орбита, изображаемая в ограниченном пространстве, чтобы она никогда не повторяла и не пересекала самому себя? Ведь система, вернувшаяся в свое прежнее состояние, согласно принятой модели, должна следовать по своему обычному пути. Чтобы воспроизвести каждый ритм, орбита должна являть собой бесконечно длинную линию на ограниченной фазовой площади. Другими словами, она должна стать фрактальной.

На самом деле к 1971-му году в научной литературе уже имелся один небольшой набросок того невообразимого чудовища, которое пытались оживить Руэлль и Такенс. Эдвард Лоренц сделал его приложением к своей статье о детерминистском хаосе, вышедшей в 1963-м году. Этот образ представлял собой сложную конструкцию из двух кривых, одна внутри другой, справа и пяти кривых слева (рис. 9). Аттрактор был устойчивым, непериодическим, имел малое число измерений и никогда не пересекал сам себя. Если бы подобное случилось, и он возвратился бы в точку, которую уже миновал, движение в дальнейшем повторялось бы, образуя периодичную петлю, но такого не происходило. Как может бесконечное множество траекторий лежать в ограниченном пространстве? До того как изображения фракталов Мандельброта буквально наводнили научный мир, представить себе особенности построений подобных форм казалось весьма трудным. Планеты, двигающиеся с точностью часового механизма, обеспечили триумф Ньютона и вдохновили Лапласа. Однако небесная механика значительно отличалась от земной: земные системы, теряющие энергию на трение, являются диссипативными, чего нельзя сказать об астрономических, считающихся гамильтонианскими.



Рис. 9. Первый странный аттрактор. В 1963 г. Эдвард Лоренц смог вычислить только первые несколько элементов аттрактора для своей простой системы уравнений. Однако он понял, что «прослойка?» двух спиральных крылообразных форм должна иметь необычную структуру, неразличимую в малых масштабах.

Прошли годы, и признание феномена странных аттракторов подготовило благодатную почву для революции в изучении хаоса, дав тем, кто занимался расчетами, ясную программу исследований. Странные аттракторы стали искать везде, где в явлениях природы ощущалась неупорядоченность. Многие утверждали, что основой погоды на планете Земля служит не что иное, как странный аттрактор. Другие, сведя воедино миллионы цифр из сводок фондовых бирж и обработав их на компьютерах, вглядывались в результаты в надежде обнаружить аттрактор и там. Странный аттрактор наполнял математическим содержанием неизвестные дотоле основные характеристики хаоса, в частности «сильную зависимость от начальных условий». Странные аттракторы казались фрактальными, то есть их истинная размерность была дробной. Никто не знал, как измерить ее или как использовать результаты подобных измерений для решения реальных задач инженерии. Аттрактор Лоренца раскрывал стабильность и скрытую структуру системы, которая при другом подходе казалась совершенно неструктурированной.

**Глава 6. Всеобщность**

Определенные характеристики (такие, например, как масса частицы) всегда считались постоянными, как и масса любого предмета, встречающегося нам в повседневной жизни. Принцип масштабирования быстро распространился благодаря тому, что трактовал величины вроде массы не как постоянные. Масса и подобные ей характеристики в процессе перенормировки варьируются как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения в зависимости от масштаба, в котором их рассматривают. Эта идея, казавшаяся полной нелепостью, была точным аналогом рассуждений Мандельброта о геометрических формах и береговой линии Великобритании (о том, что их длину невозможно измерить вне зависимости от масштаба). Здесь присутствовала определенная доля относительности. Местоположение наблюдателя – близко ли он, далеко ли, на берегу моря или на космическом спутнике – влияло на результат. Мандельброт также заметил, что наблюдаемые при переходе от одного масштаба к другому перемены подчиняются определенным закономерностям, далеким от произвольности. Изменчивость общепринятых измерений массы или длины говорила о том, что фиксированной остается некая величина иного типа. В случае с фракталами такой величиной было фрактальное измерение – инвариант, который можно рассчитать и использовать в качестве инструмента для дальнейших вычислений. Допущение, что масса может варьироваться в зависимости от масштаба, означало, что математики могут различить феномен подобия, невзирая на масштаб явления.

Файгенбаум, начав в Лос-Аламосе размышлять над феноменом нелинейности, понял, что из долгих лет своего обучения он, в сущности, не почерпнул ничего полезного. Решить систему нелинейных дифференциальных уравнений, не придерживаясь примеров из учебника, казалось невозможным. Ученый сделал вывод, что сколько-нибудь разумному физику они мало чем помогут. Имея в своем распоряжении лишь карандаш и бумагу для вычислений, Файгенбаум решил начать с аналога простого уравнения, рассмотренного в свое время Робертом Мэем применительно к биологии популяций. С таким уравнением – его можно записать как *у = r(х-х2)* – ученики средней школы знакомятся в курсе алгебры при построении параболы. Каждое значение *х* дает новое значение *у*, полученная в результате кривая выражает связь между *х* и *у* в определенном диапазоне значений, при *х*, меняющемся от нуля до *r*. Если *х* (численность популяции в текущем году) мала, то *у* (численность популяции в следующем году) также будет невелика, но больше, чем *х*. Кривая резко поднимается вверх. Если значение *х* находится в середине диапазона, то в этом случае значение *у* велико. Но парабола выравнивается близ своей вершины и начинает снижаться так, что если значение *х* велико, значение *у* вновь мало. Именно это и является эквивалентом скачков численности популяции в экологическом моделировании, предотвращая ничем не ограниченный рост. Для Мэя, а затем и для Файгенбаума главное заключалось в том, чтобы произвести это простое вычисление не один раз, а повторять его бесконечно, как в «петле обратной связи». Итоги одного подсчета служили начальными данными для следующего. Для графического представления результатов парабола оказывалась незаменимой. Надо было выбрать начальную точку на оси *х*, провести перпендикуляр вверх до пересечения с параболой, найти соответствующее значение на оси *у* и принять его за новое значение х. И так далее и тому подобное… Результат сначала будет «скакать» от одной точки к другой, а потом, вероятно, установится на уровне устойчивого равновесия, где значения *х* и *у* равны, то есть численность популяции остается неизменной.

Результат являл собой ряд чисел, не всегда достигавший в итоге стабильного значения: он мог завершиться и скачками значения в некотором интервале, или, как разъяснял Мэй своим коллегам, ряд мог продолжать изменяться совершенно хаотичным образом и настолько долго, насколько хватит терпения за ним наблюдать. Поведение числового ряда зависело от выбранного значения параметра.

В то время никто не догадывался, что Лоренц еще в 1964-м году рассматривал то же уравнение, пытаясь разрешить один вопрос, касавшийся климата. Вопрос этот был столь глубок, что почти никому не приходил в голову. Никто не задумывался, а существует ли климат, можно ли вывести долгосрочные средние значения погодных характеристик для определенных зон земного шара? Тогда, как и сейчас, большинство метеорологов считали, что ответ очевиден: конечно, любая поддающаяся измерению величина – неважно, какие она демонстрирует колебания, – должна иметь некое среднее. Если же вдуматься, все далеко не так ясно. Лоренц указывал, что средняя погода на Земле в течение последних 12 тысяч лет заметно отличалась от средних климатических условий предыдущих 12 тысяч лет, когда почти вся Северная Америка лежала под ледяным покровом. Значило ли это, что переход от одного климата к другому произошел в силу физических причин? Или упомянутые временные отрезки были периодами отклонений от стабильных долгосрочных погодных условий? А может, система, подобная погоде, никогда не усредняется?

Как и Мэй, Лоренц прежде всего выяснил, что происходит, если задавать разные значения параметра. При низких значениях числовой ряд достигал стабильной фиксированной точки, то есть модель климата вела себя абсолютно предсказуемо: погода никогда не изменялась. Умеренный рост значения параметра провоцировал колебания между двумя точками, но и в этом случае система также усреднялась. За определенной чертой появлялся хаос. Поскольку Лоренц занимался проблемой климата, его интересовало не только то, приведет ли обратная связь к периодическому поведению, – он хотел знать среднее значение полученного результата.

Лоренц выяснил, что среднее также подвержено колебаниям. При незначительном варьировании параметра оно могло измениться довольно существенно. Аналогично и земной климат мог никогда не знать прочного равновесия. Продолжая изучать изменчивые лики динамических систем, Лоренц осознал, что зависимости чуть более сложные, чем квадратичная, способны внезапно обнаруживать иные типы структур. Внутри отдельно взятой системы нередко таилось не одно устойчивое решение. Если система довольно долго демонстрировала лишь один тип поведения, это не означало, что ей в равной мере не присущ совершенно иной тип поведения. Подобные системы именуют непереходными (интранзитивными), они могут находиться или в одном, или в другом состоянии равновесия, но никак не в обоих сразу, и лишь толчок извне способен заставить систему изменить свое состояние.

Ученым, изучающим климат и использующим компьютерные программы для моделирования долгосрочного поведения атмосферы и гидросферы Земли, уже несколько лет назад стало известно, что их модели способны демонстрировать как минимум два состояния равновесия, различающихся коренным образом. Один из этих сценариев, весьма драматический, не был реализован ни в одну из минувших геологических эпох. Как бы то ни было, он остается вторым верным решением системы уравнений, управляющих земной погодой. Некоторые специалисты называют его климатом Белой Земли – планеты, континенты которой погребены под снегами, а океаны скованы льдом.

Для того чтобы вся Земля оделась во льды, необходим мощный толчок извне. Но Лоренц описал еще один тип поведения, названный им «квазиинтранзитивностью». В течение длительного времени система ведет себя примерно одинаково, флуктуации остаются в определенных границах; затем, без какой бы то ни было причины, система резко меняет свое поведение, все еще колеблясь, но обнаруживая уже другое среднее. Не нужно много фантазии, чтобы увидеть в квазиинтранзитивности вполне убедительные объяснения того, почему в истории Земли случались ледниковые периоды, наступавшие через случайные интервалы времени. Если это объяснение действительно справедливо, нет нужды доискиваться до физических предпосылок оледенения. Ледниковый период может быть побочным продуктом хаоса.

Роль Файгенбаума стала предметом ожесточенных споров. Как бы то ни было, именно Файгенбаум открыл всеобщность и создал теорию, ставшую точкой опоры для новой дисциплины.

**Глава 7. Экспериментатор**

Математик, зоолог, полиглот Томпсон пытался рассматривать жизнь как целое, в то время как его коллеги с большой пользой для себя начинали применять методы, заключавшиеся в разъединении организмов на составляющие функциональные части. *Редукционизм* торжествовал повсюду, от теории эволюции до медицины, особенно в молекулярной биологии. Как еще постигнуть живую клетку, если не путем изучения ее оболочек и ядра, а более всего белков, ферментов и хромосом? Лишь исследовав внутреннее строение сетчатки, нервов, тканей мозга, биология заинтересовалась формой черепа. Д`Арси Томпсон не принимал такого подхода. Долгие годы он оставался последним из великих ученых, посвятивших себя тщательному изучению феномена причины, особенно различия между конечной и действенной (или физической) причиной. База конечной причины – назначение или конструкция: колесо круглое, поскольку именно такая форма делает возможным передвижение. Физическая причина имеет механическую природу. Земля круглая, так как гравитационные силы стягивают вращающуюся жидкость, и та образует сфероид. Однако не всегда различие столь очевидно. Стеклянный стакан имеет цилиндрическую форму не только потому, что сосуд такой формы удобнее держать в руке; он естественным образом принимает подобную форму при центробежном литье или выдувании из стекла.

Почему же тогда Альберт Либхабер думал о работах Томпсона, начиная свои опыты с жидкостью? Представления Д`Арси Томпсона о тех силах, которые придают форму живым объектам, ближе всего подводили к рассмотрению динамических систем. Он представлял жизнь такой, какая она есть, всегда в движении, постоянно реагирующей на ритмы – «скрытые в глубине ритмы роста», которые порождают, по его мнению, всеобщие формы. Ученый считал, что исследует не материальные формы вещей, а их динамику – «интерпретацию изменения энергии на языке силы».

**Глава 8. Образы хаоса**

Математик Майкл Барнсли встретил Митчелла Файгенбаума во время конференции на Корсике в1979-м году. Барнсли, недавний выпускник Оксфорда, только-только познакомился с понятием всеобщности, удвоением периодов и бесконечным каскадом бифуркаций. «Отличная идея, – подумал он. – И конечно, все набросятся на нее, чтобы отхватить себе по кусочку». Барнсли тоже присмотрел себе кусочек, не замеченный еще ни одним из конкурентов. Откуда происходили эти циклы (2,4,8,16), эти последовательности Файгенбаума? Появились ли они, будто по мановению волшебной палочки, из математической пустоты или содержали намек на нечто более глубокое? Барнсли интуитивно чувствовал, что они – часть какого-то невероятного фрактального объекта, ускользавшего до сих пор из поля зрения ученых.

Джон Хаббард начал экспериментировать, рассматривая метод Ньютона не как средство решения задач, а как саму задачу. Он взял в качестве примера простое кубическое уравнение х3 – 1 = 0, при решении которого требуется найти кубический корень из единицы. В случае с действительными числами решение вполне тривиально – единица. Однако данный многочлен имеет также два комплексных корня: –1/2 + *i*$ \sqrt{3/2}$ и –1/2 – *i*$ \sqrt{3/2}$. Нанесенные на комплексную плоскость, три указанных корня образуют равносторонний треугольник, одна вершина которого будет находиться на трех часах, другая – на семи часах, и третья – на одиннадцати часах. Коль скоро в качестве начальной точки выбрано любое комплексное число, вопрос заключается в том, чтобы увидеть, какое именно из трех решений даст вычисление по методу Ньютона. Это все равно, что рассматривать данный метод как динамическую систему, а три решения – как три аттрактора. Или представить комплексную плоскость в виде поверхности, спускающейся к трем углублениям. Мраморный шарик, начав катиться с любой точки на плоскости, приведет в одну из долин. Какую?

Компьютер Хаббарда переходил от точки к точке, рассматривая Ньютоновым методом каждую из них и кодируя результат определенным цветом. Те начальные точки, которые вели к первому решению, стали синими, точки, генерировавшие второе решение, – красными, а тем, которые давали третий результат, был присвоен зеленый цвет. Граница между двумя цветами никогда полностью не формировалась, и даже при увеличении линия между зеленым пятном и синей областью включала в себя клочки красного цвета.

Множество Мандельброта, как любят повторять его почитатели, является наиболее сложным объектом во всей математике. Если разглядывать модель в цвете на подходящем экране, множество Мандельброта кажется более фрактальным, нежели сами фракталы, настолько оно изобилует сложностью, пронизывающей все масштабы картины. Неисчислимое многообразие фрактальных форм может быть образовано итерацией в комплексной плоскости, но система Мандельброта была одной-единственной (рис. 10).



Рис. 10. Примеры изображений, полученных с помощью множеств Джулиа

В отличие от традиционных геометрических форм, таких как окружности, эллипсы и параболы, система Мандельброта не допускает никаких сокращенных вариантов. Определить, какая форма подходит к каждому конкретному уравнению, удается только методом проб и ошибок.

Такое объединение вселенной форм с миром чисел говорило о разрыве с прошлым. Новые геометрии всегда начинаются с того, что кто-нибудь пересматривает базовый постулат. Предположим, говорит ученый, что пространство определенным образом искривлено, – и в результате получается странная пародия на Евклида, геометрия Римана-Лобачевского, которая стала основой общей теории относительности. Дальше – больше… Допустим, что пространство может иметь четыре измерения, пять и даже шесть… Вообразим, что число, выражающее измерение, может представлять собой дробь… Представим, что геометрические объекты можно закручивать, растягивать, завязывать узлами… Пусть их можно определить не решением определенного уравнения, а итерацией его с помощью петли обратной связи. Джулиа, Фато, Хаббард, Барнсли, Мандельброт – все эти математики изменили правила создания геометрических форм.

Картезианский и Евклидов методы превращения уравнений в кривые знакомы любому, кто изучал геометрию в средней школе или находил точку по карте по двум координатам. В стандартной геометрии кроме уравнений необходим также и набор чисел, которые уму удовлетворяют, тогда решения уравнения вроде х2+у2 = 1 образуют форму, в данном случае – окружность. Другим простым уравнениям соответствуют иные фигуры: эллипсы, параболы, гиперболы конических сечений и даже более сложные формы, порождаемые дифференциальными уравнениями в фазовом пространстве. Но когда геометр прибегает к итерации, вместо того, чтобы решать уравнение, последнее преобразуется из описания в процесс, из статического объекта в динамический. Подставив исходное число в уравнение, мы получим новое число, которое, в свою очередь, даст еще один результат, и так далее. Соответствующие им точки перепрыгивают с места на место. Точка наносится на график не тогда, когда она удовлетворяет уравнению, а тогда, когда она генерирует определенный тип поведения. При этом один из них может представлять собой устойчивое состояние, а другой – неуправляемое стремление к бесконечности.

Майкл Барнсли предложил «игру хаоса». Чтобы сыграть в такую игру, необходим компьютер с графическим пакетом программ и генератором случайных чисел, но в принципе будет достаточно листа бумаги и монетки. Выбираем на листе начальную точку – неважно, где именно. Придумаем два правила – для орла и для решки. Правила указывают, каким образом откладывать новые точки, например: «Переместиться на два дюйма на северо-восток» или «Приблизиться на 25% к центру». Подбрасывая монетку, начинаем отмечать точки. Используем правило орла, когда выпадает орел, и правило решки, когда выпадает решка. Если мы отбросим первые пятьдесят точек, как сдающий карты прячет первые несколько карт при новой сдаче, то обнаружится, что «игра хаоса» воспроизводит не случайное поле или разбросанные точки, а форму, проявляющуюся все более и более четко по мере продолжения игры. Основное предположение Барнсли звучало так: множества Джулиа и другие фрактальные формы, хотя и считаются по справедливости итогом детерминированного процесса, обладают второй равнозначной ипостасью как предел неупорядоченного процесса.

Говоря на языке динамики, формы Барнсли оказались аттракторами. Барнсли быстро обнаружил, что может воспроизвести ставшие уже классическими фракталы из книги Мандельброта. Техника последнего представляла собой бесконечную последовательность построений и совершенствований: скажем, для создания снежинки Коха или ковра Серпински нужно, удалив линейные сегменты, заменить их точно определенными фигурами. Применяя вместо этого «игру хаоса», Барнсли создавал изображения, казавшиеся вначале лишь расплывчатыми карикатурами, но со временем вырисовывавшиеся все более четко. Вместо процесса усовершенствования, в котором не возникало необходимости, использовался лишь один набор правил, с помощью которого в итоге и воплощалась нужная форма.

**Глава 9. Группа динамических систем**

«Нас объединило то, что мы все смотрели вдаль, – объяснял Паккард. – Мы были поражены, выяснив, что упорядоченные физические системы, затертые до дыр в курсе классической физики, порождают нечто таинственное, если слегка изменить параметры, нечто такое, к чему неприменим огромный аналитический аппарат». Фармер добавлял: «В философском плане обнаруженное ошеломило меня. Ведь это был действенный путь примирения свободы воли с детерминизмом. В самом деле: система является детерминистской, но мы не знаем, как она себя поведет в дальнейшем!

Исследование хаоса, проведенные в Санта-Крусе, наиболее существенно затронули тот раздел математики, в котором присутствует изрядная доля философии и который называется теорией информации. Эта теория была создана в конце 40-х годов Клодом Шенноном, американским инженером, трудившимся в лабораториях компании «Белл телефон». Поскольку информация хранилась в ячейках компьютерной памяти в двоичном представлении, один разряд такой ячейки, содержащий единицу или ноль (что соответствует понятиям «да» или «нет») и названный битом, стал основной мерой информации (см. также [Введение в теорию информации](http://baguzin.ru/wp/?p=2562))

Теория информации исследовала такое важнейшее понятие, как «избыточность. Согласно теории информации Шеннона обычный язык более чем на 50% избыточен, то есть содержит звуки или буквы, которые не являются строго необходимыми для передачи сообщения. Знакомая идея, не правда ли? Надежность связи в мире, где невнятно проговаривают слова и допускают опечатки, существенным образом зависит от избыточности. Именно элемент избыточности помогает людям решать кроссворды или вставлять пропущенное слово, если оно заканчивается, к примеру, буквой «а».

По Шеннону, поток информации в обычном языке является менее чем случайным; каждый новый бит частично ограничен предшествующими; таким образом, каждый новый бит несет в себе в некоторой степени меньше содержания, чем тот, что заключает в себе реальную информацию. В такой формулировке просматривается некий парадокс: чем выше доля случайности в потоке данных, тем больше информации будет передано каждым новым битом. Весьма ценная в техническом плане для начала компьютерной эры, теория информации Шеннона мало что привнесла в философию. Ее главный вклад, привлекший внимание специалистов других областей, выражается одним-единственным словом – энтропия.

Концепция энтропии восходит к термодинамике; она фигурирует во втором законе, гласящем, что Вселенная и каждая отдельная система в ней неизбежно стремятся к нарастанию беспорядка. Разделите бассейн на две части, поставив между ними перегородку. Наполните одну часть водой, а другую – чернилами. Дождитесь, пока поверхность успокоится, а затем снимите перегородку. Вы увидите, что лишь посредством случайного перемешивания молекул воды и чернила со временем перемешаются. Этот процесс никогда не повернет вспять, сколько ни жди.

Роберт Шоу узрел в аттракторах движущую силу информации. Согласно его первоначальной и главнейшей концепции, хаос указывает естественный путь возврата к живым физическим наукам, к тем идеям, которые теория информации почерпнула из термодинамики. Странные аттракторы, соединяющие порядок и беспорядочность, придали новую значимость измерению энтропии систем. Они являются эффективными смесителями, которые создают непредсказуемость и таким образом повышают энтропию. По представлениям Шоу, они порождают информацию там, где ее ранее не существовало.

Паккард замечал: «Кульминацией сложной динамики являются биологическая эволюция и процессы мышления. Интуиция подсказывает, что существует четкий принцип, с помощью которого эти сверхсложные системы генерируют данные. Миллиарды лет назад существовали лишь частицы протоплазмы, затем появились все мы. Итак, информация создавалась и хранилась в нашей собственной структуре. Несомненно, что в ходе развития разума человека, начиная еще с детства, информация не только аккумулируется, но и порождается из тех связей, которых ранее не существовало».

Сидя в кафе, они забавлялись тем, что спрашивали: далеко ли отсюда находится ближайший странный аттрактор? Уж не то ли дребезжащее автомобильное крыло? Или флаг, трепещущий от легкого ветерка? Дрожащий лист на ветке? «Вы не увидите объект до тех пор, пока верно выбранная метафора не позволит воспринять его», – замечал Шоу, вторя Томасу С. Куну.

Идеи, зародившиеся в Санта-Крусе, легли кирпичиком в фундамент современной методологии исследования хаоса. Когда физик, имеющий массу данных, намеревался определить их размерность или энтропию, в ход шли методы, придуманные в годы подсоединения штекеров к аналоговому компьютеру модели «Systron-Donner» и напряженных наблюдений за экраном осциллографа.

Измерение аттрактора являлось «первым уровнем знаний, необходимых для характеристики его качеств». Данное свойство обеспечивало «количество информации, требуемое для того, чтобы установить положение точки на аттракторе с заданной точностью».

**Глава 10. Внутренние ритмы**

*Науки не пытаются объяснять, вряд ли они даже стараются интерпретировать – они в основном создают модели. Под моделью понимается математическая конструкция, которая при добавлении некоторых словесных объяснений описывает изучаемый феномен. Оправданием для такой математической конструкции служит единственное обстоятельство: ожидается, что она сработает.
Джон фон Нейман*

Воздействие регулярных циклов друг на друга объясняет способность групп осцилляторов, в том числе и биологических, таких как клетки сердечной ткани и нервные клетки, функционировать синхронно. Удивительный пример из мира природы дают светлячки, встречающиеся в Юго-Восточной Азии: в брачный период они собираются на деревьях в неисчислимых количествах и мерцают в удивительно гармоничном ритме. Для всех явлений регуляции важным свойством является устойчивость – способность системы противостоять малым возмущениям. Для биологических объектов не менее важна гибкость, то есть способность системы нормально функционировать под воздействием целого ряда частот. Преобладание одной-единственной частоты может воспрепятствовать адаптации системы к изменениям, так как живые организмы должны гибко реагировать на быстро меняющиеся и непредсказуемые обстоятельства. Ни один сердечный тон или дыхательный ритм не может быть сведен к точным периодичностям простейших физических моделей.

Некоторые исследователи, в их числе Эри Голдбергер из медицинской школы Гарварда, предположили, что здоровая динамика жизненных процессов задается физическими фрактальными структурами, такими как разветвляющиеся сети бронхиальных трубок в легких и проводящие волокна в сердце, которые обеспечивают широкий диапазон ритмов. Размышляя об аргументах Роберта Шоу, Голдбергер заметил: «Фрактальные процессы, ассоциируемые с масштабными спектрами с широкой полосой частот, являются «информационно богатыми». Напротив, периодичные состояния отражают спектр с узкой полосой частот и определяются монотонными, повторяющимися последовательностями, лишенными всякой информативности».

Арнольд Мэнделл, психиатр из Сан-Диего, пошел еще дальше по пути изучения хаоса в физиологии. «Возможно ли, чтобы математическое отклонение, то есть хаос, было здоровьем? А то, что математика считает нормой, – предсказуемость и различимость структур – являлось болезнью?».

«Достижение равновесия в биологии означает смерть, – повторял он. Ученый считал рассматриваемую проблему концептуальной. Традиционные методы лечения «наиболее нестабильного динамического механизма с бесконечным числом измерений» были линейными и редукционистскими. «Основная парадигма такова: ген -> пептид -> фермент -> нейротрансмиттер -> рецептор -> поведение животного -> клинический синдром -> лекарственный препарат -> клиническая оценка его эффективности. И такой подход определяет почти всю исследовательскую работу и лечение в рамках психофармакологии. Более пятидесяти трансмиттеров, тысячи типов клеток, сложная электромагнитная природа и длительная нестабильность порождают автономную активность на всех уровнях, начиная от протеинов и заканчивая электроэнцефолограммой. И мозг все еще считается простым химическим стимулятором!» Знакомые с нелинейной динамикой не могли воспринимать это иначе как наивность. Мэнделл убеждал коллег вникнуть в геометрию, присущую таким сложнейшим системам, как мозг.

Чтобы не думали о хаосе специалисты, исследующие процесс познания, они не могли больше моделировать разум как статическую структуру. Двигаясь от нейронов по восходящей, они выявили целую иерархическую сеть, которая обеспечивает взаимодействие микро- и макромасштабов, столь характерных для турбулентности в жидкостях и для других сложных динамических процессов. Структура, зарождающаяся среди бесформенности, – такова главная прелесть живого и его основная загадка.

**Глава 11. Хаос. Что лежит за ним?**

Двадцать лет назад большинство ученых-практиков придерживались определенных воззрений на феномен сложности. Поведение простых систем является простым. Сложное поведение подразумевает сложные причины. Поведение разных систем различно. Ныне все изменилось. За последние двадцать лет математики, физики, биологи и астрономы выработали альтернативную идею: *простые системы дают начало сложному поведению, а сложные системы порождают простое поведение*. И что самое главное, законы сложности обладают всеобщностью, которая ни в коей мере не зависит от особенностей составляющих систему элементов.

Все больше и больше специалистов понимали, что хаос позволяет продолжить работу с информацией, отложенной в долгий ящик потому, что она выглядела чересчур странной. Обособление научных дисциплин казалось им все более досадным препятствием, один за другим ученые осознавали, что изучать обособленные от целого части бесполезно. Для них *хаос ознаменовал конец редукционизма в науке*.

И все же ученые не могли определиться с понятием «хаос». Каждый предлагал свое толкование: Филип Холмс, седобородый математик и поэт из Корнелла, – сложные апериодические динамические системы (обычно с малым числом измерений); Хай Бай-Линь, китайский физик, собравший много основополагающих работ о хаосе в один справочник, – тип порядка, которому несвойственна периодичность; Родерик В. Дженсен из Йельского университета, физик-теоретик, изучающий возможность квантового хаоса, – иррегулярное и непредсказуемое поведение детерминистских нелинейных динамических систем; Джеймс Кручфилд из Санта-Круса, – поведение, которое порождает информацию (усиливает малые неопределенности), но не является полностью предсказуемым; Хаббард же видел главное в том, что простые процессы в природе могли порождать величественные конструкции огромной сложности без всякой случайности. Все инструменты, необходимые для кодировки, а затем и раскрытия богатейших, как человеческий мозг, структур, заключались в нелинейности и обратной связи.

Хаос стал совокупностью идей, убедившей ученых в том, что все они – участники одного начинания. И физики, и биологи, и математики – все поверили, что простые детерминистские системы могут порождать сложность, а системы, слишком сложные для традиционной математики, подчиняются простым законам. Поверили они также и в то, что главная их задача, независимо от сферы деятельности, состояла в постижении самой сложности.

Обычная наука, как выразился Кун, «сбилась с пути, и ей больше не удается обходить аномальные явления».

1. [Диссипативные](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B8%D0%BF%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B2%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%81%D0%B8%D0%BB%D1%8B) — силы, при действии которых на механическую систему ее полная механическая энергия убывает (то есть диссипирует), переходя в другие, немеханические формы энергии, например, в теплоту. [↑](#footnote-ref-1)