

Содержание

Пролог	11
Глава 1 Эффект бабочки	21
Глава 2 Революция	47
Глава 3 Взлеты и падения жизни	79
Глава 4 Геометрия природы	107
Глава 5 Странные аттракторы	156
Глава 6 Универсальность	199
Глава 7 Экспериментатор	239
Глава 8 Образы хаоса	266
Глава 9 Группа динамических систем	303
Глава 10 Внутренние ритмы	343
Глава 11 Хаос. Что лежит за ним?	374
Послесловие	393
<i>Примечания</i>	401
<i>Благодарности</i>	427

Глава 1

Эффект бабочки

Физикам нравится думать, будто все, что надо сделать, сводится к фразе: вот начальные условия, что случится дальше?

РИЧАРД ФЕЙНМАН

Солнце катилось по небу, никогда не знавшему облаков. Ветры обтекали землю, гладкую как стекло. Ночь никогда не наступала, осень никогда не сменялась зимой. Никогда не шел дождь. Погода, смоделированная новым компьютером Эдварда Лоренца, менялась медленно, но вполне определенно, напоминая ясный полдень в межсезонье, как будто мир превратился в сказочный Камелот или некое легкое подобие Южной Калифорнии¹.

Из своего окна Лоренц мог наблюдать реальную погоду: утренний туман, окутавший почти весь кампус Массачусетского технологического института, или низкие облака с Атлантики, нависающие над верхушками крыш. Ни то ни другое не появлялось в его компьютерной модели. Сама вычислительная машина *Royal McBee* — скопище проводов и вакуумных ламп — занимала добрую половину кабинета Лоренца, была раздражающе шумной и ломалась не реже раза в неделю. Это устройство не обладало ни достаточным быстродействием, ни объемом памяти, необходимым для того, чтобы построить реальную модель атмосферы и гидросферы Земли. И все же в 1960 году Лоренц создал мини-модель погоды, которая привела в восторг его коллег. Каждую минуту компьютер выдавал стройные ряды чисел. Посвященным они сообщали, что господствующее сейчас западное направление ветра скоро сменится на северное, потом на южное и вновь

на северное. Оцифрованные циклоны в компьютере Лоренца медленно кружили по воображаемому глобусу. Как только об этом узнали на факультете, преподаватели и старшекурсники стали заключать пари, пытаясь угадать, какой будет искусственная погода в следующий момент. Неведомым образом машина никогда не повторялась.

Лоренц просто наслаждался погодой — весьма полезная склонность для исследователя-метеоролога. Смакуя изменчивость атмосферных явлений, он постигал природу происходящего в скоплениях воздушных вихрей и циклонов, которые, неизменно подчиняясь математическим законам, в точности не повторялись ни разу. Ученому казалось, что облакам присуща особая структура. Раньше он опасался, что научное исследование погоды будет сродни попыткам разобрать шкатулку с секретом при помощи отвертки. Теперь же Лоренц гадал, способно ли вообще рациональное знание проникнуть в это таинство. Погода обладала свойствами, которые нельзя объяснить с помощью средних величин. Средняя температура в июне в Кембридже и Массачусетсе держится на уровне 75 градусов по Фаренгейту*. Дождливая погода в Эр-Рияде в Саудовской Аравии выпадает в среднем на десять дней в году — вот о чем говорила статистика. Суть же вопроса заключается в том, как именно сменяются модели атмосферных процессов с течением времени. Ее-то и сумел ухватить Лоренц.

Творец и вседержитель компьютерной вселенной, он волен был устанавливать законы природы по своему усмотрению. После нескольких проб и ошибок, отнюдь не божественного свойства, он выбрал двенадцать уравнений, описывающих связь между температурой и атмосферным давлением, а также давлением и скоростью ветра². Лоренц применил на практике законы Ньютона — вполне подходящий инструмент для Небесного Часовщика, который сотворил мир

* Примерно 24 градуса по Цельсию.

и устанавливает завод на вечность. Благодаря детерминизму физических законов дальнейшего вмешательства не требовалось. Творцы машинных моделей верили, что ныне и во веки веков законы движения подводят под их расчеты базу математической определенности. Постигни закон — и ты поймешь Вселенную. В этом заключалась философия компьютерного моделирования погоды.

Мыслители XVIII века представляли себе Творца благожелательным и не склонным к излишнему вмешательству в мирские дела наблюдателем. Именно таким и был Лоренц. Он принадлежал к типу чудаковатых ученых. Удивительные глаза его всегда смеялись, придавая усталому лицу фермера-янки неизменно веселое выражение. Он редко говорил о себе и о своей работе, предпочитая слушать, и при этом частенько уносился мыслью в такие дали, что был недостижим для коллег. Самые близкие его друзья чувствовали, что львиную долю своего свободного времени Лоренц проводит в облачных мирах.

Мальчиком он был просто помешан на погоде и составлял весьма точные таблицы дневной температуры, фиксируя с помощью термометра ее минимумы и максимумы в Уэст-Хартфорде, штат Коннектикут, где жила его семья. Впрочем, чаще всего он сидел дома, погруженный в сборники математических головоломок. Иногда Эдвард решал их вместе с отцом. Однажды они столкнулись с особенно сложной задачей, которая оказалась неразрешимой. Ничего страшного, утешил отец, всегда можно попробовать решить задачу, доказав, что решения вовсе не существует. Лоренца пленила эта мысль, ясная, как и вся математика³. Окончив в 1938 году Дартмутский колледж, он решил посвятить себя этой науке. Однако обстоятельства помешали его планам: началась Вторая мировая война. Лоренц стал метеорологом ВВС США. После войны он не только не оставил занятий метеорологией, но и изучил ее теоретические основы, расширив и углубив свои математические познания. Работа, посвященная общему круговороту

атмосферы, принесла ему известность. Одновременно Лоренц продолжал заниматься прогнозированием.

Даже самые серьезные и опытные метеорологи вряд ли считали наукой составление прогнозов погоды — заурядное ремесло для набивших руку и не лишенных интуиции людей, работа, которой присуща некая доля шаманства. В крупных научных центрах вроде Массачусетского технологического института метеорологи тяготели к проблемам, имеющим строгое решение. Лоренц, как и любой другой специалист, вполне сознавал прагматическое назначение прогнозов, составляемых в помощь военной авиации, но до поры до времени скрывал свой теоретический интерес к прогнозированию с позиций математики.

Мало того что метеорологи презирали прогнозирование — в 1960-е годы почти все уважающие себя ученые еще и не доверяли компьютерам. Эти счетные машины, значение которых было явно преувеличено, вряд ли могли рассматриваться как инструмент для серьезных занятий наукой. Таким образом, численное моделирование погоды оказалось делом весьма неблагодарным, хотя время для него было самым подходящим. Вот уже два столетия наука об атмосфере ждала появления машины, способной снова и снова производить тысячи вычислений, повинуюсь указаниям человека. Лишь компьютер мог реализовать ньютоновское обещание, что мир идет по пути детерминизма, а погода подчиняется законам, столь же незыблемым, как и принципы движения планет, наступления солнечных и лунных затмений, морских приливов и отливов. Теоретически электронная машина позволяла метеорологам предпринять то, что астрономы проделывали с помощью карандаша и логарифмической линейки: рассчитать будущее Вселенной, исходя из ее начального состояния и физических закономерностей, управляющих ее эволюцией. Уравнения, описывающие циркуляцию воздуха и воды, были так же хорошо известны, как и те, которым подчинялся ход планет. Кстати, астрономы не достигли совершенства — оно недо-

стижимо в Солнечной системе, раздираемой тяготением девяти* планет, множества спутников и астероидов. Тем не менее астрономические расчеты были столь точны, что люди подчас забывали об их прогностическом характере. 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 полета космических кораблей и ракет. Отсюда следовало предположение: так почему бы не рассчитать поведение ветра и облаков?

Погода, при всей сложности этого феномена, подчиняется тем же законам ньютоновской механики. Пожалуй, сверхмощный компьютер мог бы стать высшим разумом, способным, по представлениям философа-математика XVIII века Лапласа, воспринявшего идеи Ньютона особенно близко, описать “единой формулой движения как наиболее крупных тел во Вселенной, так и легчайшего атома; для него не осталось бы ничего неопределенного, и будущее предстало бы перед ним наряду с прошлым”⁴. В эпоху, когда господствовали теория относительности Эйнштейна и принцип неопределенности Гейзенберга, оптимизм Лапласа казался просто шутовством; однако многие современные ученые попытались воплотить его мечту. Стремление исследователей XX века — биологов, физиологов, экономистов — разложить свои миры на атомы, подчиняющиеся законам науки, вполне понятно. Во всех этих дисциплинах господствовал детерминизм сродни ньютоновскому. Отцы-основатели современных компьютерных технологий всегда помнили о Лапласе, и развитие ЭВМ шло бок о бок с развитием прогнозирования еще с тех пор, когда в 1950-х годах Джон фон Нейман сконструировал свои первые машины в Институте перспективных исследований в Принстоне, штат Нью-Джерси. Кстати, Нейман признавал, что моделирование погоды может стать идеальным заданием для компьютера.

* Уже восьми: в 2006 году Плутон переведен в статус “карликовых планет”.

Впрочем, существовало одно маленькое “но” — столь незначительное, что ученые старались позабыть о нем, упрятать подальше, как прячут в ящик стола неоплаченный счет. Измерения 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. Небольшими воздействиями можно пренебречь. Существует сходство в поведении объектов, и сколь угодно малые воздействия не усиливаются настолько, чтобы оказывать сколь угодно большое влияние”⁵. Как правило, вера в приблизительность и сходство вполне себя оправдывает. Крошечная погрешность в определении координат кометы Галлея в 1910 году незначительно исказила прогноз времени следующего ее появления, которое состоялось в 1986 году. Эта ошибка останется столь же малой в ближайшие миллионы лет. Компьютеры, направляющие космические корабли, на основе относительно точных исходных данных выдают относительно точный результат. С тем же успехом действуют экономисты, составляя свои прогнозы, хотя результат их работы и не столь очевиден. Пионеры прогнозирования погоды не были исключением.

С помощью своего примитивного компьютера Лоренц буквально разобрал погоду по кирпичикам, но все же казалось, что в его распечатках поведение ветра и температуры обнаруживает нечто узнаваемое с житейской точки зрения. Так проявлялась зрелая интуиция исследователя, его чувство погоды, которая, по ощущению Лоренца, повторялась, демонстрируя время от времени одни и те же схемы поведения: давление

росло и падало, воздушные массы устремлялись то на север, то на юг. Ученый выяснил, что, когда кривая плавно идет вниз, не образуя ярко выраженного максимума, на графике вскоре обозначаются две резкие выпуклости. Лоренц утверждал, что эту закономерность вполне мог бы использовать в своей работе метеоролог⁶. Однако повторения никогда не были полностью идентичными. В рамках общей модели всякий раз обнаруживались отклонения — своего рода упорядоченный беспорядок.

Чтобы сделать результаты своих исследований более понятными, Лоренц создал несложный график: вместо изображения обычных рядов чисел машина стала печатать некоторое количество пробелов, за которыми следовала буква А. Ученый выбирал одну переменную, например направление воздушного потока, и постепенно символы заполняли собой весь рулон запроваженной в принтер бумаги, образуя извилистую кривую, множество холмов и долин, изображавших отклонения западного ветра к северу и к югу в масштабах всего Северо-Американского континента. Эти линии, подчиненные определенным законам, узнаваемые циклы, появлявшиеся снова и снова, но каждый раз в несколько ином виде, обладали гипнотическим очарованием. Казалось, система медленно раскрывает Лоренцу свои секреты.

Однажды зимним днем 1961 года, намереваясь изучить определенную последовательность событий, он несколько сократил исследование — приступил к построению не с начальной точки, а с середины. В качестве исходных данных ученый ввел цифры из предыдущей распечатки. Когда спустя час он вернулся, отдохнув от шума и выпив чашку кофе, он увидел нечто неожиданное, давшее начало новой науке.

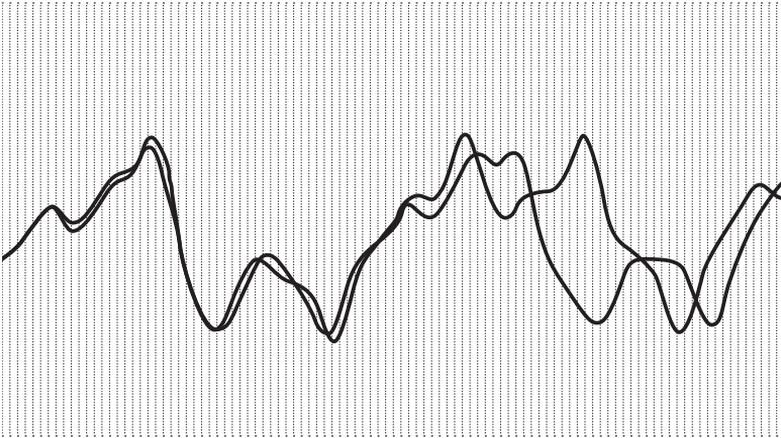
Новые вычисления должны были полностью повторить предыдущие, ведь Лоренц собственноручно ввел в компьютер числа, а программа оставалась неизменной. Тем не менее график существенно расходился с полученным ранее. Лоренц

посмотрел сначала на один ряд чисел, потом на другой. С таким же успехом он мог наугад выбрать две случайные модели погоды. Первое, о чем он подумал: вышла из строя вакуумная лампа.

Но внезапно ученый все понял⁷. Машина работала нормально, а разгадка заключалась в числах, заложенных им в компьютер. Машина могла хранить в памяти шесть цифр после запятой: 0,506127. На распечатку же, в целях экономии места, выдавалось всего три: 0,506. Лоренц ввел укороченные, округленные значения, предположив, что разница в тысячных долях несущественна.

Предположение выглядело вполне разумным. Если спутник, наблюдающий за погодой, способен фиксировать температуру поверхности океана с точностью до тысячных долей, это можно считать крупным везением. *Royal McBee* Лоренца выполнял программу, в которую заложили детерминистскую систему уравнений: отправляясь от заданной начальной точки, компьютер строил модель погоды каждый раз по одному и тому же сценарию. Логично было предположить, что при незначительном отличии начальной точки от введенной ранее модель будет чуть-чуть расходиться с предыдущим вариантом. Небольшая числовая погрешность походила на еле уловимое дуновение ветерка. Казалось, малозаметные перемещения воздушных масс неизбежно затухнут или погасят друг друга, не успев вызвать крупномасштабные изменения погоды. И все-таки в системе уравнений Лоренца малые погрешности оказались катастрофическими⁸.

Ученый решил внимательно изучить, каким образом разошлись два почти идентичных исходно графика. Он скопировал одну из полученных кривых на прозрачную бумагу и наложил ее на вторую, чтобы проследить отклонения. Первые максимумы почти совпали, но потом одна из линий начала слегка отставать. Когда оба графика достигли второго максимума, их фазы уже определенно различались. К третьему и четвертому максимумам все сходство исчезало.



Расхождение двух графиков погоды. Эдвард Лоренц заметил, что его программа моделирует поведение погодных процессов, которые хотя и берут начало примерно в одной точке, дальше все более и более отклоняются друг от друга, пока сходство в конце концов не исчезает. (Из распечаток Лоренца 1961 г.)

Был ли в том виноват несовершенный компьютер? Лоренц мог предположить, что либо его подвела машина, либо модель изначально была сконструирована неудачно, — по крайней мере, он должен был так подумать. Но, руководствуясь математической интуицией, которую коллеги Лоренца оценили не сразу, исследователь внезапно осознал: что-то выбилось из накатанной колеи! Практическая важность открытия могла оказаться огромной, и, хотя уравнения Лоренца являлись лишь грубой имитацией погоды на земном шаре, он уверовал, что ему открылась сущность реальной атмосферы. И впервые понял: долгосрочное прогнозирование погоды обречено⁹.

“Нам не всегда сопутствовала удача в наших изысканиях, и теперь мы нашли причину, — говорил ученый. — Думаю, люди полагали, что возможно предсказать погоду на длительный период времени, потому что в мире существуют физические феномены, которые вполне поддаются прогнозированию”.

ванию, например затмения и океанические течения. Я никогда не считал прогнозы приливов и отливов предсказаниями, воспринимая их как факты, хотя, безусловно, это предсказания. Явления приливов и отливов, как, впрочем, и атмосферные процессы, вряд ли можно считать простыми, но в обоих случаях имеются периодические компоненты, за счет которых можно предугадать, например, что следующее лето будет теплее зимы. Для погоды в подобном утверждении как будто нет ничего нового — мы это и так знаем. Зато для приливов прогнозируемая часть как раз представляет интерес, а составляющая, поддающаяся прогнозу, достаточно мала, если только не наступит шторм. Итак, если приливы и отливы могут быть с достаточной точностью предсказаны на несколько месяцев вперед, то вполне резонно звучит вопрос: почему мы не в силах проделать то же самое в отношении атмосферы? В конце концов, это просто еще одна текучая среда, и ее законы примерно так же сложны. Однако я понял, что любая неперiodичная физическая система непредсказуема¹⁰.

Пятидесятые и шестидесятые годы XX века стали временем неоправданного оптимизма по поводу возможностей предсказания погоды¹¹. Газеты и журналы наперебой твердили о надеждах, возлагаемых на новую науку — даже не столько на прогнозирование, сколько на изменение погодных условий и управление ими. Развивались сразу две технические новации: цифровые компьютеры и искусственные спутники Земли, и оба новшества использовались в международном проекте, названном Глобальной программой исследования атмосферы. Говорили даже, что человечество освободится от произвола стихий, став повелителем, а не жертвой атмосферы. Кукурузные поля накроют геодезическими куполами, небосклон очистят от туч самолетами, ученым станет ясен механизм запуска и остановки дождя.