

ДЖЕЙМС ГЛИК

ХАОС

СОЗДАНИЕ
НОВОЙ
НАУКИ

Почему снежинки
не похожи друг на друга?

Corpus

ЭЛЕМЕНТЫ 2.0

Книги Политеха

Джеймс Глик

Хаос. Создание новой науки

«Corpus (АСТ)»

1987,2008

УДК 51
ББК 22.1

Глик Д.

Хаос. Создание новой науки / Д. Глик — «Corpus (ACT)»,
1987,2008 — (Книги Политеха)

ISBN 978-5-17-116057-9

«Хаос. Создание новой науки» — мировой бестселлер американского журналиста Джеймса Глика, переведенный более чем на два десятка языков, в котором он рассказывает историю возникновения науки о хаосе. Начав со случайного открытия метеоролога Эдварда Лоренца, пытавшегося создать модель долгосрочного прогноза погоды, Глик последовательно реконструирует всю цепочку внезапных озарений и необычных экспериментов, которые привели ученых к осознанию, что существуют еще неизвестные им универсальные законы природы. Глик не только рассказывает историю рождения новой науки, но и размышляет над тем, каким образом происходит научный прогресс и какова в нем роль безумных гениев, занимающихся поисками нестандартных решений вопреки имеющемуся знанию. В формате PDF А4 сохранен издательский макет.

УДК 51
ББК 22.1

ISBN 978-5-17-116057-9

© Глик Д., 1987,2008
© Corpus (ACT), 1987,2008

Содержание

Пролог	6
Глава 1	12
Глава 2	28
Конец ознакомительного фрагмента.	31

Джеймс Глик
Хаос
Создание новой науки

Синтии

*Человеческое – мелодия, природное – дисгармония...
Джон Андайк*

James Gleick
Chaos
Making a New Science

* * *

This edition is published by arrangement with InkWell Management LLC and Synopsis Literary Agency

Охраняется законом РФ об авторском праве. Воспроизведение всей книги или любой ее части воспрещается без письменного разрешения издателя. Любые попытки нарушения закона будут преследоваться в судебном порядке.

© James Gleick, 1987, 2008

© М. Нахмансон, наследники, Е. Барашкова, перевод на русский язык, 2001, 2021

© А. Бондаренко, Д. Черногаев, художественное оформление серии, 2021

© ООО «Издательство АСТ», 2021 Издательство CORPUS®

Пролог

В 1974 году полицию небольшого городка Лос-Аламос, штат Нью-Мексико, задержали сообщениями, что после наступления темноты по глухим улочкам бродит странный человек¹. Из ночи в ночь огонек его сигареты проплывал в темноте. Не ведая цели, он часами блуждал в свете звезд, легко проникавшем разреженный горный воздух. Недоумевала не только полиция. Некоторые ученые из Национальной физической лаборатории также удивлялись экспериментам новоиспеченного коллеги с 26-часовыми сутками. Такой распорядок выбивался из расписания всех остальных людей, живущих в нормальном суточном ритме. Даже для группы теоретической физики это граничило с чудачеством.

За тридцать лет, прошедших с тех пор, как Роберт Оппенгеймер выбрал пустынное плато в штате Нью-Мексико для создания центра разработки атомного оружия, Национальная лаборатория в Лос-Аламосе превратилась в крупнейший научный институт, который располагал ускорителями, газовыми лазерами, химическими лабораториями, обеспечивал работой тысячи специалистов: физиков, инженеров, администраторов, а кроме того, стал одним из мировых центров, владеющих самыми мощными компьютерами. Некоторые из старейших сотрудников лаборатории еще помнили деревянные здания, наспех возведенные среди скал в начале 1940-х годов, однако для следующего поколения ученых Лос-Аламоса – молодых мужчин и женщин в потертых вельветовых штанах и форменных рубашках – крестные отцы первой атомной бомбы были чем-то вроде привидений. Средоточием «чистой» мысли в лаборатории служил теоретический отдел, или отдел *T* (компьютерная служба и сектор вооружений маркировались соответственно литерами *K* и *X*). Более сотни опытных физиков и математиков трудились в нем на хорошо оплачиваемых позициях, свободных от «академических нагрузок» – преподавания и публикации научных трудов. Эти люди уже имели дело с натурами гениальными и эксцентричными, а потому удивить их было нелегко.

Но Митчелл Фейгенбаум составлял исключение из правил. За всю свою научную карьеру он опубликовал лишь одну статью и продолжал работать над чем-то совершенно бесперспективным. Выглядел он весьма примечательно: открытый лоб, копна густых волос зачесана назад, как у немецких композиторов прошлого века, глаза большие, выразительные. Фейгенбаум изъяснялся скороговоркой, глотая на европейский манер артикли и местоимения, словно не был уроженцем Бруклина. Работал он с маниакальным упорством, но, если дело не спорилось, бросал все и бродил, размышляя, преимущественно ночью. Двадцатичетырехчасовые сутки казались ему слишком короткими. Тем не менее Фейгенбаум был вынужден свернуть свой эксперимент по персональной квазипериодичности, когда понял, что не может больше просыпаться на закате (а такое при его распорядке дня случалось частенько).

К двадцати девяти годам Фейгенбаум снискал репутацию признанного эксперта, и многие сотрудники лаборатории прибегали к его советам, если, разумеется, ухитрялись застать коллегу на месте. Однажды, придя вечером на работу, Фейгенбаум столкнулся в дверях с директором лаборатории Гарольдом Эгнью. Тот был заметной личностью: ученик самого Оппенгеймера, он находился на борту самолета-наблюдателя, сопровождавшего бомбардировщик *Enola Gay* во время атаки на Хиросиму, и заснял весь процесс доставки первого детища лаборатории к земле.

«Наслышан о ваших талантах, – бросил директор Фейгенбауму. – Почему бы вам не заняться чем-нибудь стоящим? Скажем, термоядерной реакцией, управляемой лазером?»²

¹ Фейгенбаум, Каррутерс, Кэмпбелл, Фармер, Вишер, Керр, Хасслачер, Джен.

² Фейгенбаум, Каррутерс.

Даже друзья Фейгенбаума задавались вопросом, способен ли он оставить свое имя в веках. Человек, шутя разрешавший трудности коллег, казалось, был равнодушен к тому, что сулило славу. Ему, например, нравилось размышлять о турбулентности в жидкостях и газах. Раздумывал он и о свойствах времени: непрерывно оно или дискретно, как чередование сменяющих друг друга кадров киноленты. Еще его занимала способность человеческого глаза отчетливо различать цвет и форму предметов во Вселенной, пребывающей, по мнению физиков, в состоянии квантового хаоса. Он размышлял об облаках, наблюдая за ними с борта самолета, а затем, когда в 1975 году ему урезали финансирование на поездки, с утесов, обступивших лабораторию.

На гористом американском западе облака мало похожи на ту темную бесформенную дымку, что низко стелется над восточным побережьем. Над Лос-Аламосом, лежащим на дне большой вулканической впадины-кальдеры, облака кочуют в беспорядке, но структура их в каком-то смысле упорядоченна. Они принимают формы горных цепей или изрытых глубокими морщинами образований, похожих на поверхность мозга. Перед бурей, когда небеса мерцают и дрожат от зарождающегося в их недрах электричества, эти пропускающие и отражающие свет облака видны за тридцать миль. А весь небесный купол являет взору человеческому грандиозное зрелище, безмолвный укор физикам, которые обходят своим вниманием облака – феномен, хоть и структурированный и доступный наблюдению, но слишком расплывчатый и совершенно непредсказуемый. Вот о подобных вещах и размышлял Фейгенбаум – тихо, незаметно и не очень продуктивно.

Физику ли думать про облака? Его дело – лазеры, тайны кварков, их спин, цвет и аромат, загадки зарождения Вселенной. Облаками же пусть занимаются метеорологи. Эта проблема из разряда «очевидных» – так называются на языке физиков-теоретиков задачи, которые опытный специалист способен разрешить путем анализа и вычислений. Решение «неочевидных» проблем приносит исследователю уважение коллег и Нобелевскую премию. Самые сложные загадки, к которым нельзя подступиться без длительного изучения первооснов и главных законов мироздания, ученые именуют «глубокими». Немногие коллеги Фейгенбаума догадывались о том, что в 1974 году он занимался действительно глубокой проблемой – хаосом.

С началом хаоса заканчивается классическая наука. Изучая природные закономерности, физики почему-то долго пренебрегали хаотическими проявлениями: формированием облаков, турбулентностью в морских течениях, скачками численности популяций растений и животных, колебаниями 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 начали изучать хаотические явления. Математики, физики, биологи, химики принялись искать связи между различными типами беспорядочного в природе. Физиологи обнаружили присутствие некоего порядка в хаотических сокращениях сердечных мышц, что является основной причиной внезапной и необъяснимой смерти. Экологи исследовали колебания численности популяций шелкопряда. Экономисты раскопали старые биржевые сводки, опробовав на них новые методы анализа рынка ценных бумаг. В результате выяснилось, что обнаруженные закономерности имеют прямое отношение ко множеству других природных явлений – очертаниям облаков, формам разрядов молний, конфигурации сеточек кровеносных сосудов, кластеризации звезд в Галактике.

Когда Митчелл Фейгенбаум приступил к исследованию хаоса, он был одним из немногих энтузиастов, разбросанных по всему миру и почти незнакомых друг с другом. Математик из Беркли, штат Калифорния, собрал вокруг себя небольшую группу и трудился над созданием теории так называемых динамических систем. Биолог из Принстонского университета

начал готовить к публикации проникновенный меморандум с призывом к коллегам заинтересоваться удивительно сложным поведением биологических популяций, наблюдаемым в некоторых простых моделях. Математик, работающий на компанию IBM, искал термин для описания семейства новых форм: зубчатых, запутанных, закрученных, расколотых, изломанных, которые, по его мнению, являлись неким организующим началом в природе. Французский специалист по математической физике набрался смелости заявить, что турбулентность в жидкостях, возможно, имеет некоторое отношение к необычному, бесконечно запутанному абстрактному объекту, который он назвал «странным аттрактором».

Десять лет спустя понятие «хаос» дало название стремительно развивающейся дисциплине, которая перевернула всю современную науку. Хаос стал предметом обсуждения для множества конференций и научных журналов. Ведомства, отвечающие за государственные программы военных исследований, ЦРУ и министерство энергетики выделили крупные суммы на изучение хаоса³. В любом большом университете и в исследовательских лабораториях любых корпораций есть ученые, занятые прежде всего проблемой хаоса, а затем уже своей основной профессиональной областью. В Лос-Аламосе был создан Центр нелинейных исследований для координации работ по изучению хаоса и связанных с ним проблем; подобные учреждения появились также в университетских городках по всей стране.

Хаос вызвал к жизни новые способы использования компьютеров и новые типы графиков, которые способны воспроизводить фантастические и тонкие структуры, лежащие в основе сложности. Новая наука дала миру особый язык и новые понятия: фрактал, бифуркация, перемежаемость, периодичность и другие. Все это – новые элементы движения, подобно тому как в традиционной физике кварки и глюоны стали новыми элементарными частицами материи⁴. Для некоторых ученых хаос – скорее наука переходных процессов, чем теория неизменных состояний; учение о становлении, а не о существовании⁵.

Как утверждают современные теории, хаос присутствует везде: закручивается струйка сигаретного дыма, трепещет и полощется флаг на ветру, капли воды из подтекающего крана одна за одной то срываются вниз, то словно выжидают. Хаос обнаруживается и в капризах погоды, и в траектории движения летательного аппарата, и в поведении автомобилей в дорожной пробке, и в том, как струится нефть по нефтепроводу⁶. Каковы бы ни были особенности конкретной системы, ее поведение подчиняется одним и тем же недавно открытым закономерностям. Осознание этого факта заставило управляющих компаниями пересмотреть отношение к страхованию, астрономов – под другим углом взглянуть на Солнечную систему, а политологов – изменить мнение о причинах вооруженных конфликтов⁷.

Хаос проявляет себя на стыке областей знания. Будучи наукой о глобальной природе систем, теория хаоса объединила ученых, работающих в весьма далеких друг от друга областях. «Пятнадцать лет назад науке угрожал кризис все возрастающей специализации, – заметил ответственный за финансирование исследований чиновник военно-морского министерства США, выступая перед аудиторией математиков, биологов, физиков и медиков. – Удивительно, но эта тенденция превратилась в свою прямую противоположность благодаря феномену хаоса!»⁸ Хаос вызывает к жизни вопросы, которые плохо поддаются решению традиционными методами, однако позволяют сделать общие заключения о поведении сложных систем. Все первые теоретики хаоса – ученые, давшие начальный толчок развитию этой дисциплины, –

³ Бачел, Шлезингер, Вишневецки.

⁴ Йорк.

⁵ Browand F. K. «The Structure of Turbulent Mixing Layer» // *Physica*. 1986. Vol. 18D. P. 135.

⁶ К изучению поведения автомобилей в дорожной пробке особенно серьезно подошли японские ученые; см. Musha T., Higuchi H. «The 1/f Fluctuation of a Traffic Current on an Expressway» // *Japanese Journal of Applied Physics*. 1976. P. 1271–1275.

⁷ Mandelbrot R., Wisdom M., Alvin M. S. «Chaos – A Model for the Outbreak of War» // *Nature*. 1984. Vol. 309. P. 303–305.

⁸ Шлезингер.

имели нечто общее. Они замечали определенные закономерности, особенно такие, которые проявляются в разном масштабе в одно и то же время. У них выработалось особенное чутье, позволявшее оценивать случайность и сложность, предвидеть внезапные скачки мысли. Верующие в хаос – а они иногда действительно называют себя верующими, новообращенными или евангелистами – выдвигают смелые гипотезы о предопределенности и свободе воли, об эволюции и о природе возникновения разума. Они 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 системы как целого.

Наиболее страстные защитники новой науки даже утверждают, что грядущим поколениям XX век будет памятен лишь благодаря созданию теории относительности, квантовой механики и теории хаоса⁹. Хаос, заявляют они, стал третьей из революций, последовательно освобождавших физику от догматов ньютоновского видения мира¹⁰. По словам одного физика, теория относительности разделалась с иллюзиями Ньютона об абсолютном пространстве-времени, квантовая механика развеяла мечту о контролируемом процессе измерения и, наконец, теория хаоса развенчала Лапласову фантазию о полной предопределенности развития систем¹¹. Из этих трех открытий лишь теория хаоса применима к Вселенной, которую мы можем наблюдать и ощущать, к объектам, которые доступны человеку. Повседневный опыт и реальная картина мира стали уместным предметом исследований. Давно уже зрело ощущение, пусть и не выражавшееся открыто, что теоретическая физика далеко уклонилась от интуитивных представлений человека об окружающем мире. Насколько обоснованна эта еретическая мысль, никому не известно, но теперь некоторые специалисты, считавшие, что физика рано или поздно загонит себя в угол, видят в хаосе выход из тупика.

Исследования хаоса произросли из непопулярных областей физической науки. Главным ее направлением в XX веке считалась физика элементарных частиц, которая исследовала основные элементы, слагающие материю, при все более высоких энергиях, больших масштабах и коротких отрезках времени и породила современные теории о природе физических взаимодействий и происхождении Вселенной. И все же некоторые молодые ученые чувствовали себя разочарованными. Прогресс замедлился, поиски новых частиц не имели успеха, а сама теория стала весьма запутанной. Недовольным казалось, что вершины сияющих абстракций физики высоких энергий и квантовой механики слишком долго доминировали в науке.

В 1980 году космолог Стивен Хокинг, лукасовский профессор¹² математики Кембриджского университета, выразил мнение большинства ученых в обзорной лекции, посвященной развитию теоретической физики и названной «Не наступает ли конец физической теории?»: «Мы уже знаем физические законы, описывающие абсолютно все, с чем нам приходится сталкиваться в обычной жизни... И можно считать своеобразным комплиментом успехам теоретической физики тот факт, что нам приходится создавать сложнейшие приборы и тратить огромные деньги и усилия для того, чтобы поставить эксперимент, результаты которого мы не можем предсказать»¹³.

⁹ Шлезингер.

¹⁰ Форд.

¹¹ Ford J. «What Is Chaos, That We Should Be Mindful of It?», preprint. Georgia Institute of Technology. P. 12.

¹² Именная позиция в Кембридже (одна из самых престижных научных должностей в мире), названная по имени благодетеля Генри Лукаса, завещавшего в 1663 году средства для ее финансирования. Вторым лукасовским профессором был сэр Исаак Ньютон, с тех пор ее часто неформально называют «ньютоновской». – Здесь и далее, если не указано иное, прим. науч. ред.

¹³ Boslough J. *Stephen Hawking's Universe*. Cambridge: Cambridge University Press, 1980; см. также: Shaw R. *The Dripping Faucet as a Model Chaotic System*. Santa Cruz: Aerial, 1984. P. 1.

Однако Хокинг признал, что понимание законов природы в терминах физики элементарных частиц оставило без ответа вопрос о том, как применять эти законы к любым системам, кроме простейших. Предсказуемость предсказуемости рознь. Одно дело – предсказать, что произойдет в камере Вильсона, когда там столкнутся две частицы, разогнанные на ускорителе, и совсем другое – предсказать поведение бурлящей в обычной ванне жидкости, или погоду, или процессы в человеческом мозге.

Хокингову физику, успешно собирающую Нобелевские премии и крупные гранты на дорогостоящие эксперименты, часто называли революционной. Временами казалось, что священный Грааль науки – теория Великого объединения, называемая также теорией всего, – вот-вот окажется в руках «революционеров». Физики проследили развитие энергии и материи во Вселенной всюду и везде, кроме кратчайшего момента ее зарождения. Но действительно ли физика элементарных частиц послевоенного периода была революцией? Или же она лишь «наращивала мясо» на основу, заложенную Эйнштейном, Бором и другими создателями теории относительности и квантовой механики? Безусловно, достижения физики, от атомной бомбы до транзистора, изменили реальность XX века. Тем не менее круг вопросов, которыми занималась физика частиц, казалось, сузился. И сменилось не одно поколение, прежде чем в этой сфере возникла новая идея, изменившая взгляд на мир обычного, рядового человека.

Физика Хокинга могла исчерпать себя, так и не ответив на некоторые фундаментальные вопросы, поставленные природой: как зародилась жизнь, что такое турбулентность, как во Вселенной, подчиняющейся закону повышения энтропии и неумолимо движущейся ко все большему и большему беспорядку, может возникнуть порядок? Кроме того, многие объекты повседневной жизни, например жидкости и системы, подчиняющиеся законам классической механики, уже казались столь обыкновенными и хорошо изученными, что физики перестали ожидать от них каких-либо сюрпризов. Но вышло иначе.

По мере того как революция хаоса набирает обороты, виднейшие ученые без всякого смущения возвращаются к феноменам «человеческого масштаба». Они изучают не галактики, а облака. Приносящие прибыль компьютерные расчеты выполняются не на «креях», а на «макинтошах»¹⁴. Ведущие научные журналы рядом со статьями по квантовой физике публикуют исследования, посвященные загадкам движения шарика, который прыгает по столу. Многие простейшие системы, оказывается, обладают исключительно сложным и непредсказуемым хаотическим поведением. И все же в подобных системах иногда самопроизвольно возникает порядок: порядок и хаос в них сосуществуют. Лишь новая научная дисциплина могла положить начало преодолению огромного разрыва между знаниями о том, как действует единственный объект – одна молекула воды, одна клеточка сердечной ткани, один нейрон – и как ведут себя миллионы таких объектов.

Понаблюдайте за двумя островками водяной пены, кружащимися бок о бок у подножия водопада. Можете ли вы угадать, каково было их взаимное положение до того, как они обрушились с водопадом вниз? Вряд ли. С точки зрения традиционной физики только что не сам Господь Бог перемешивает молекулы воды в водопаде. Как правило, получив сложный результат, физики ищут сложные объяснения, и, если им не удастся обнаружить устойчивую связь между начальным и конечным состояниями системы, они считают, что реалистичности ради в теорию, описывающую эту систему, должен быть «встроен» элемент случайности – искусственно сгенерированный шум или погрешность. 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 –

¹⁴ *Cray* – название компании, производящей суперкомпьютеры. *Macintosh* – название персональных компьютеров, выпущенных компанией *Apple*.

подобный феномен называют «сильной зависимостью от начальных условий». Применительно к погодным явлениям это выливается в так называемый эффект бабочки: сегодняшнее трепетание крыльев мотылька в Пекине через месяц может вызвать ураган в Нью-Йорке.

Пытаясь отыскать истоки новой науки в прошлом, исследователи хаоса обнаруживают много предвестников переворота. Однако один из них стоит особняком. 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 Фейнман

Эдвард Лоренц и его мини-модель погоды. Компьютер ведет себя странно. Долгосрочный прогноз погоды невозможен. Порядок, выдающий себя за случайность. Мир нелинейности. «Мы упустили самую суть».

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 Калифорнии¹⁵.

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, способен 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 Фаренгейту¹⁶. Дожливая погода в Эр-

¹⁵ Лоренц, Малкус, Шпигель, Фармер. По сути, Лоренц создал три ключевые работы, центральная из которых: «Deterministic Nonperiodic Flow» // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. Vol. 20. P. 130–141. Она дополнена еще двумя: «The Mechanics of Vacillation» // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1963. Vol. 20. P. 448–464; «The Problem of Deducing the Climate from the Governing Equations» // *Tellus*. 1964. Vol. 16. P. 1–11. Вместе они составляют обманчивое в своей легковесности исследование, которое и двадцать лет спустя продолжало влиять на умы математиков и физиков. Некоторые погодные модели, построенные лично Лоренцем с помощью его первого компьютера, см.: «On the Prevalence of Aperiodicity in Simple Systems» // *Global Analysis* / Ed. by M. Marsden and J. Marsden. New York: Springer-Verlag, 1979. P. 53–75.

¹⁶ Примерно 24 градуса по Цельсию.

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 ветра¹⁷. Лоренц применил на практике законы Ньютона – вполне подходящий инструмент для Небесного Часовщика, который сотворил мир 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 недосыгаем для коллег. Самые близкие его друзья чувствовали, что львиную долю своего свободного времени Лоренц проводит в заоблачных 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-Хартворде, 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 математика¹⁸. 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 кото-

¹⁷ Современное описание проблемы использования уравнений в погодном моделировании, изложенное Лоренцем, см.: «Large-Scale Motions of the Atmosphere: Circulation» // *Advances In Earth Science* /Ed. by P. M. Hurley. Cambridge, Mass.: The M. I. T. Press, 1966. P. 95–109. Одно из самых ранних и вдохновляющих исследований этой проблемы: Richardson L. F. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge: Cambridge University Press, 1922.

¹⁸ Лоренц. Как в его мышлении сочетались математические и метеорологические основания, см.: «Irregularity: A Fundamental Property of the Atmosphere», Crafoord Prize Lecture presented at the Royal Swedish Academy of Sciences, Stockholm, Sept. 28, 1983 // *Tellus*. 1984. Vol. 36A. P. 98–110.

рых 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, повинувшись указаниям человека. Лишь компьютер мог реализовать ньютоновское обещание, что мир идет по пути детерминизма, а погода подчиняется законам, столь же неизменным, 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 недостижимо в Солнечной системе, раздираемой тяготением девяти¹⁹ 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»²⁰. В эпоху, когда господствовали теория относительности Эйнштейна и принцип неопределенности Гейзенберга, оптимизм Лапласа казался просто шутковством; 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.

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 влия-

¹⁹ Уже восьми: в 2006 году Плутон переведен в статус «карликовых планет».

²⁰ Laplace P. S. de. *A Philosophical Essay on Probabilities*. New York: Dover, 1951.

ние»²¹. Как правило, вера в приближенность и сходство вполне себя оправдывает. Крошечная погрешность в определении координат кометы Галлея в 1910 году незначительно искажала 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 метеоролог²². 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 понял²³. 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 зало-

²¹ Уинфри.

²² Лоренц.

²³ «On the Prevalence». P. 55.

жили 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 катастрофическими²⁴.

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

²⁴ Из всех классических физиков и математиков, которые размышляли над динамическими системами, лучше всех возможности хаоса осознал Жюль Анри Пуанкаре. В работе «Наука и метод» он писал: «Таким образом, совершенно ничтожная причина, ускользающая от нас по своей малости, вызывает значительное действие, которого мы не можем предусмотреть, и тогда мы говорим, что это явление представляет собой результат случая. Если бы мы знали точно законы природы и состояние Вселенной в начальный момент, то мы могли бы точно предсказать состояние Вселенной в любой последующий момент. Но даже и в том случае, если бы законы природы не представляли собой никакой тайны, мы могли бы знать первоначальное состояние только приближенно. Если это нам позволяет предвидеть дальнейшее ее состояние с тем же приближением, то это все, что нам нужно. Мы говорим, что явление было предвидено, что оно управляется законами. Но дело не всегда обстоит так; иногда небольшая разница в первоначальном состоянии вызывает большое различие в окончательном явлении. Небольшая погрешность в первом вызвала бы огромную ошибку в последнем. Предсказание становится невозможным...» (Пуанкаре А. *О науке*. М.: Наука, 1990. – Прим. ред.) С переходом из XIX века в XX его предупреждение было забыто; единственным математиком в США, который продолжал следовать заветам Пуанкаре в 1920–1930-е годы, был Джордж Биркгоф. Так случилось, что он недолгое время был наставником Эдварда Лоренца в Массачусетском технологическом институте.

мере, он должен был так подумать. Но, руководствуясь математической интуицией, которую коллеги Лоренца оценили не сразу, исследователь внезапно осознал: что-то выбилось из нака- танной колеи! Практическая важность открытия могла оказаться огромной, и, хотя уравне- ния Лоренца являлись лишь грубой имитацией погоды на земном шаре, он уверовал, что ему открылась сущность реальной атмосферы. И впервые понял: долгосрочное прогнозирование погоды обречено²⁵.

«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 под- даются прогнозированию, 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, не поддающаяся про- гнозу, 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 непериодичная физическая система непредсказуема»²⁶.

Пятидесятые и шестидесятые годы XX века стали временем неоправданного оптимизма по поводу возможностей предсказания погоды²⁷. 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. Гово- рили 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.

Эти иллюзии были посеяны Нейманом, создавшим свой первый компьютер с твердым намерением использовать вычислительную машину и для управления погодой. Он окружил себя метеорологами и захватывающе рассказал о своих планах коллегам-физикам. У Неймана были особые математические причины для оптимизма. Он полагал, что сложная динамическая система имеет точки неустойчивости – критические точки, в которых слабый толчок может привести к огромным последствиям, как это происходит с мячиком, балансирующим на вер- шине холма. Нейман верил, что с помощью компьютера ученые смогут рассчитать уравнение движения жидкости и предсказать погоду на следующие несколько дней²⁸. После этого, если центральный комитет метеорологов сочтет нужным ее изменить, в небо поднимутся самолеты, чтобы оставить за собой дымовую завесу или разогнать облака. Великолепная перспектива! Однако Нейман не учел вероятность хаоса, при котором неустойчива каждая точка.

К 1980-м годам разветвленный и дорогостоящий аппарат служащих рьяно взялся выпол- нять поставленную Нейманом задачу, по крайней мере ту ее часть, которая была связана с

²⁵ Лоренц; а также см.: «On the Prevalence». P. 56.

²⁶ Лоренц.

²⁷ Вудс, Шнейдер; см. также большой обзор экспертных мнений того времени: «Weather Scientists Optimistic That New Findings Are Near» // *The New York Times*. 1963. 9 September. P. 1.

²⁸ Дайсон.

составлением прогнозов²⁹. На окраине одного из городов штата Мэриленд, близ Вашингтонской кольцевой автострады, в простом, похожем на куб здании, которое обилием радиоантенн и радаров, установленных на крыше, напоминало разведцентр, трудились ведущие ученые Америки. Здесь мощнейший суперкомпьютер производил моделирование, напоминавшее разработку Лоренца, но лишь по сути и духу. *Royal McBee* мог выполнять шестьдесят умножений в секунду, тогда как быстродействие новой машины *Control Data Cyber 205* составляло миллионы операций с плавающей запятой в секунду. Там, где Лоренц использовал двенадцать уравнений, современный компьютер справлялся с системой, состоявшей из пятисот тысяч уравнений. Этой машине был известен механизм колебаний температуры воздуха при конденсации и испарении жидкости. Виртуальные воздушные потоки зарождались в компьютерных горных цепях. Информация, поступающая со всего земного шара, со спутников, самолетов и кораблей, вводилась в компьютер ежечасно. В результате по точности прогнозов Национальный метеорологический центр США занял второе место в мире.

А первое место занял Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды, расположенный в английском Рединге, небольшом университетском городке в часе езды от Лондона. Скромное современное здание из стекла и кирпича, затененное деревьями, построили в годы торжества идеи общего рынка, когда большинство государств Западной Европы решили действовать сообща, объединив интеллектуальные и денежные ресурсы для предсказания погоды. Европейцы приписывали свои успехи молодости сменяющих друг друга сотрудников, которые не состояли на государственной службе, и суперкомпьютеру *Cray*, который был на порядок совершеннее американского аналога.

Прогнозирование погоды стало отправной точкой, с которой началось применение компьютеров для моделирования сложных систем. Используемая методика сослужила хорошую службу множеству представителей естественных, точных и гуманитарных наук. С ее помощью ученые пытались предугадать буквально все, начиная с динамики маломасштабных жидкостных потоков, изучаемых конструкторами двигателей, и заканчивая денежными потоками, изучаемыми экономистами. В самом деле, к 1970–1980-м годам компьютерные прогнозы экономического развития напоминали глобальные предсказания погоды. Модели, представлявшие собой хитросплетенную, до некоторой степени произвольную паутину уравнений, преобразовывали известные начальные условия – будь то атмосферное давление или денежную массу – в будущие тенденции. Программисты надеялись, что неизбежные упрощающие предположения не слишком сильно искажают истину. Если на выходе получалось нечто странное – наводнение в Сахаре или повышение процентных ставок на несколько порядков, – уравнение подправляли таким образом, чтобы подогнать результат под ожидаемый. Как это ни печально, эконометрические модели мало соответствовали реальности, но это не мешало многим людям, которым следовало бы лучше понимать, что к чему, вести себя так, будто они верили в итоги изысканий. Прогнозы экономического роста и безработицы составлялись с точностью до сотых, а то и тысячных долей³⁰. Правительства и финансовые институты субсидировали прогнозирование и действовали в соответствии с ним – зачастую в силу необходимости, а иногда просто желая получить лучший результат. Возможно, они все же знали, что показатели вроде «потребительского оптимизма» не столь хорошо поддаются измерению, как, например, влажность воздуха, и что дифференциальных уравнений, идеально отражающих политические движения или изменения в мире моды, еще никто не создал. Но лишь немногие осознавали, сколь ненадежен был сам процесс компьютерного моделирования, даже в тех случаях, когда исходным данным вполне можно доверять, а законы заимствованы из физики, как в случае с предсказанием погоды.

²⁹ Боннер, Бенгтссон, Вудс, Лейт.

³⁰ Medawar P. B. «Expectation and Prediction» // *Pluto's Republic*. Oxford: Oxford University Press, 1982. P. 301–304.

Истинный успех компьютерного моделирования состоит в том, что составление прогнозов погоды из искусства превратилось в науку. По оценкам Европейского центра, мировая экономика ежегодно сберегала миллиарды долларов благодаря предсказаниям, которые статистически были лучше, чем ничего. Однако прогнозы, составленные более чем на два-три дня, оказывались крайне умозрительными, а более чем на неделю – просто бесполезными.

Причина заключалась в эффекте бабочки³¹. Стоит возникнуть незначительному и кратковременному погодному явлению – а для глобального прогноза таковыми могут считаться и грозовые штормы, и снежные бури, – как предсказание утрачивает актуальность. Погрешности и случайности множатся, каскадом накладываясь на турбулентные зоны атмосферы, начиная от пылевых вихрей и шквалов и заканчивая воздушными токами в масштабах целого материка, отслеживать которые удается лишь из космоса.

Современное моделирование погоды работает с сетками точек, отстоящих друг от друга на шестьдесят миль. Тем не менее о некоторых начальных данных приходится лишь догадываться, поскольку наземные станции и спутники не вездесущи. Предположим, что поверхность земного шара усеяна датчиками, удаленными друг от друга лишь на фут, и они контролируют атмосферу по всей высоте³². Допустим, каждый датчик передает исключительно точную информацию о температуре, давлении, влажности и любой другой нужной метеорологу величине. Точно в полдень компьютер огромной мощности считывает все данные и вычисляет, что случится в каждой из точек в 12:01, в 12:02, в 12:03 и так далее.

И все же компьютер не сможет предсказать, солнечная или дождливая погода ожидается в Принстоне через месяц. В полдень небольшие отклонения температуры от среднего значения в пространстве между датчиками будут недоступны компьютеру. К 12:01 эти отклонения повлекут за собой небольшие погрешности, которые со временем станут нарастать и выльются в огромные ошибки.

Но даже опытные метеорологи не догадывались об этом. Одним из близких друзей Лоренца был Роберт Уайт, исследователь-метеоролог из Массачусетского технологического института. Когда Лоренц рассказал Уайту об эффекте бабочки и о том, какое значение он может иметь для долгосрочного прогнозирования атмосферных явлений, Уайт ответил словами Неймана:

«Дело не в предсказании, а в управлении»³³. Его мысль заключалась в том, что небольшие изменения под контролем человека могут вызвать желаемые крупномасштабные перемены.

Но Лоренц смотрел на это по-другому. Да, мы можем изменить погоду, мы можем заставить атмосферу вести себя иначе, не так, как она вела бы себя без нашего вмешательства. Но мы никогда не узнаем, что происходило бы, если бы мы этого не сделали. Это все равно что заново тасовать уже хорошо перетасованную колоду карт. Нам ясно, что это изменит ситуацию, но неизвестно – к лучшему или к худшему.

Открытие Лоренца было случайным – звено в цепи неожиданных прозрений, восходящей еще к Архимеду с его ванной. Но Лоренц не принадлежал к числу тех, кто торопится кричать: «Эврика!» Руководимый инстинктивной прозорливостью, он приготовился идти дальше тем же путем и изучать последствия своего открытия, чтобы выяснить его роль в образовании потоков во всех видах жидкости.

³¹ Изначально Лоренц использовал для описания эффекта образ чайки, а тот образ, который используется сейчас, по-видимому, позаимствован из его работы «Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?» и связан с выступлением на ежегодном собрании Американской ассоциации содействия развитию науки в Вашингтоне 29 декабря 1979 года.

³² Йорк.

³³ Лоренц, Уайт.

Остановись Лоренц на эффекте бабочки, этом символе торжества случая над предопределенностью, в его распоряжении не оказалось бы ничего, кроме плохих новостей. Но Лоренц в своей модели погоды видел нечто большее, чем просто встроенную в нее хаотичность, – там наблюдалась изящная геометрическая структура, некий порядок, выдающий себя за случайность. Лоренц, будучи математиком по призванию и метеорологом по профессии, начал в конце концов вести двойную жизнь. Помимо работ по метеорологии из-под его пера выходили статьи, где несколько вступительных строк о теории атмосферных процессов растворялись в математическом тексте.

Он уделял все больше и больше внимания математике систем, не имевших устойчивого состояния; систем, которые почти повторяли сами себя, но делали это не абсолютно точно. Известно, что погода как раз и является такой аperiodической системой. Мир полон подобных систем, и не нужно далеко ходить за примерами: численность популяций животных то растет, то падает, делая это почти периодически, и аналогично, вопреки людским надеждам, вспыхивают и затухают эпидемии. И если бы погода когда-нибудь повторилась с точностью до облака и порыва ветра, тогда, вероятно, она стала бы повторяться и дальше – и проблема прогнозирования потеряла бы актуальность.

Лоренц чувствовал, что должна существовать связь между неповторяемостью атмосферных явлений и неспособностью метеорологов предсказать их – иными словами, связь между аperiodичностью и непредсказуемостью³⁴. Найти простые уравнения для аperiodичности было делом нелегким – поначалу компьютер воспроизводил идеально повторяющиеся циклы – однако после череды небольших усложнений своей модели Лоренц все же достиг успеха. Это произошло, когда он ввел в машину уравнение, описывающее изменение количества тепла при движении с востока на запад, соответствующее реальной разнице в том, как солнце нагревает восточное побережье Северной Америки и Атлантический океан. В результате повторяющиеся циклы исчезли.

Эффект бабочки был не случайностью, но необходимостью. Допустим, небольшие возмущения так и остаются небольшими, не нарастая в системе, рассуждал ученый. Приближаясь к ранее пройденному состоянию, погода будет повторяться и в дальнейшем. Циклы станут предсказуемыми и в конце концов потеряют все свое очарование. Чтобы воспроизвести богатый спектр реальной погоды земного шара, ее чудесное многообразие, вряд ли можно желать чего-либо лучшего, чем эффект бабочки.

Как уже говорилось, данный феномен имеет и строгое научное название: «сильная зависимость от начальных условий». Эта зависимость не была абсолютной новостью, например, ее превосходно иллюстрирует детский стишок³⁵:

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,
Оттого что в кузнице не было гвоздя³⁶.

³⁴ «The Mechanics of Vacillation».

³⁵ Перевод С. Я. Маршака.

³⁶ Джордж Херберт; в этом контексте цит. по: Wiener N. «Nonlinear Prediction and Dynamics» // *Collected Works with Commentaries* / Ed. by P. Masani. Cambridge, Mass.: The M. I. T. Press, 1981. P. 3:371. Винер не был согласен с Лоренцем как минимум в признании наличия «самостоятельных колебаний незначительных деталей на погодной карте». Он отмечал: «Торнадо – в высшей степени локальный феномен, и его точный путь могут определять мелочи, не влияющие глобально больше ни на что».

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 и распространяются повсюду. В системах, подобных погоде, сильная зависимость от начальных условий представляет собой неизбежное следствие взаимодействия процессов, происходящих на разных масштабах.

Коллеги Лоренца были изумлены тем, как он соединил аperiodичность и сильную зависимость от начальных условий в своей миниатюрной модели погоды. Всего двенадцать уравнений, раз за разом просчитываемые с механической точностью! Как может подобное многообразие, такая непредсказуемость – в чистом виде хаос! – возникнуть из простой детерминистской системы?

Отложив на время занятия погодой, Лоренц стал искать более простые способы воспроизвести сложное поведение объектов. Один из них был найден в виде системы из трех нелинейных, то есть выражающих не прямую пропорциональную зависимость, уравнений. Линейные соотношения изображаются на графике прямой линией и достаточно просты для понимания: чем больше x , тем больше y . Линейные уравнения всегда разрешимы, что делает их подходящими для учебников. Линейные системы обладают неоспоримым достоинством: вы можете разбирать их на некие модули, а затем собирать снова, как конструктор, – эффекты будут попросту суммироваться³⁷.

Нелинейные системы в общем виде не могут быть решены, и эффекты в них не складываются. Изучая жидкостные и механические системы, специалисты обычно стараются исключить нелинейные элементы, к примеру трение. Если пренебречь им, можно получить простую линейную зависимость между ускорением хоккейной шайбы и силой, придающей ей это ускорение. Приняв в расчет трение, мы усложним формулу, поскольку сила трения будет меняться в зависимости от того, с какой скоростью шайба уже движется. Нелинейность означает, что каждое действие меняет правила игры. Влияние трения не является постоянным, потому что оно зависит от скорости. Скорость, в свою очередь, зависит от трения. Из-за этой обоюдной изменчивости рассчитать нелинейность весьма непросто. Вместе с тем она порождает разнообразные типы поведения объектов, не наблюдаемые в линейных системах. В динамике жидкостей все сводится к одному дифференциальному уравнению: уравнению Навье – Стокса. Будучи удивительно коротким, оно связывает скорость, давление, плотность и вязкость жидкости. Но оно нелинейно, и поэтому природу этих связей зачастую невозможно уловить, так как исследовать поведение нелинейного уравнения – все равно что блуждать по лабиринту, стены которого перестраиваются с каждым вашим шагом. Как сказал Нейман, «характер уравнения... меняется одновременно во всех релевантных отношениях; меняется как порядок, так и степень. Отсюда могут проистекать большие математические сложности»³⁸. Другими словами, мир был бы совсем иным и хаос не был бы так уж необходим, если бы в уравнении Навье – Стокса не таился демон нелинейности.

Три уравнения Лоренца были порождены особым видом движения в текучих средах – когда нагретые слои газа или жидкости поднимаются кверху. Это явление называется кон-

³⁷ Тут имеется в виду следующее. Пусть есть линейное уравнение типа $\ddot{x} + x = a(t) + b(t) + c(t)$. Это уравнение описывает динамику колебательного процесса, и здесь $a(t)$, $b(t)$ и $c(t)$ – слагаемые, отвечающие за различные внешние воздействия. например, можно представить себе ребенка, качающегося на качелях в ветреную погоду. тогда $a(t)$ будет обозначать усилия самого ребенка, $b(t)$ – усилия его родителей, помогающих раскачиваться, и $c(t)$ – силу ветра. можно разобрать исходное уравнение на кусочки, а именно – решить три отдельных уравнения, каждое из которых учитывает только один из трех эффектов (то есть $\ddot{x} + x = a(t)$, $\ddot{x} + x = b(t)$ и $\ddot{x} + x = c(t)$). Если теперь сложить решения этих уравнений, результат будет решением исходного уравнения. Эта аддитивность и является как раз следствием линейности – нелинейные уравнения таким свойством не обладают.

³⁸ Neumann J. von. «Recent Theories of Turbulence» (1949) // *Collected Works* / Ed. by A. H. Taub. Oxford: Pergamon Press, 1963. P. 6:437.

векцией. В атмосфере конвекция как бы перемешивает воздух, нагревающийся при соприкосновении с теплой почвой. Можно заметить, как струящиеся конвекционные волны поднимаются, подобно привидениям, над раскаленным асфальтом или другими поверхностями, излучающими тепло. Лоренц испытывал искреннюю радость, рассказывая о конвекции в чашке с горячим кофе³⁹. По его утверждению, это один из бесчисленных гидродинамических процессов в нашей Вселенной, поведение которых нам, вероятно, захочется предугадать. Как вычислить, насколько быстро остынет чашка кофе? Если напиток не горячий, теплота рассеется без всякого гидродинамического движения и жидкость перейдет в стабильное состояние. Однако, если кофе горячий, конвекция повлечет перемещение жидкости более высокой температуры со дна чашки на поверхность, где температура ниже. Этот процесс наблюдается особенно отчетливо, если в чашку с горячим кофе капнуть немного сливок – тогда видишь, сколь сложно кружение жидкости. Впрочем, будущее состояние подобной системы очевидно: движение неизбежно прекратится, поскольку теплота рассеется, а перемещение частиц жидкости будет замедлено трением. Как поясняет Лоренц, «у нас могут быть трудности с определением температуры кофе через минуту, но предсказать ее значение через час нам уже гораздо легче»⁴⁰. Уравнения движения, определяющие изменение температуры кофе в чашке, должны отражать будущее состояние этой гидродинамической системы. Они должны учитывать эффект рассеивания, при котором температура жидкости стремится к комнатной, а скорость перемещения ее частиц – к нулю.

Отгалкиваясь от совокупности уравнений, описывающих конвекцию, Лоренц будто разобрал их на части, выбросив все, что могло показаться несущественным, и таким образом значительно упростил систему⁴¹. От первоначальной модели не осталось почти ничего, кроме факта нелинейности. В результате уравнения, с точки зрения физика, приобрели довольно простой вид. Взглянув на них – а это делал не один ученый на протяжении многих лет, – можно было с уверенностью сказать: «Я смог бы их решить».

Лоренц придерживался иного мнения: «Многие, увидев такие уравнения и заметив в них нелинейные элементы, приходят к выводу, что при решении эти элементы несложно обойти. Но это заблуждение».

Простейший пример конвекции можно наблюдать в жидкости, наполняющей сосуд с ровным дном, которое можно нагревать, и с гладкой поверхностью, которую можно охлаждать. Разница температур между горячим дном и прохладной поверхностью порождает потоки жидкости. Если разница небольшая, жидкость остается неподвижной; теплота перемещается к поверхности благодаря теплопроводности, как в металлическом бруске, не преодолевая естественного стремления жидкости находиться в покое. К тому же такая система устойчива: случайные движения в ней, происходящие, например, когда лаборант нечаянно заденет сосуд, обычно скоро затухают и жидкость возвращается в состояние покоя.

Но стоит увеличить температуру, как поведение системы меняется. По мере нагревания жидкость расширяется снизу, становится менее плотной, а значит, и чуть легче – достаточно, чтобы преодолеть трение; в результате вещество устремляется к поверхности. Если конструкция сосуда хорошо продумана, в нем появляется цилиндрический вал: горячая жидкость поднимается по одной из стенок, а охлажденная спускается по противоположной. Понаблю-

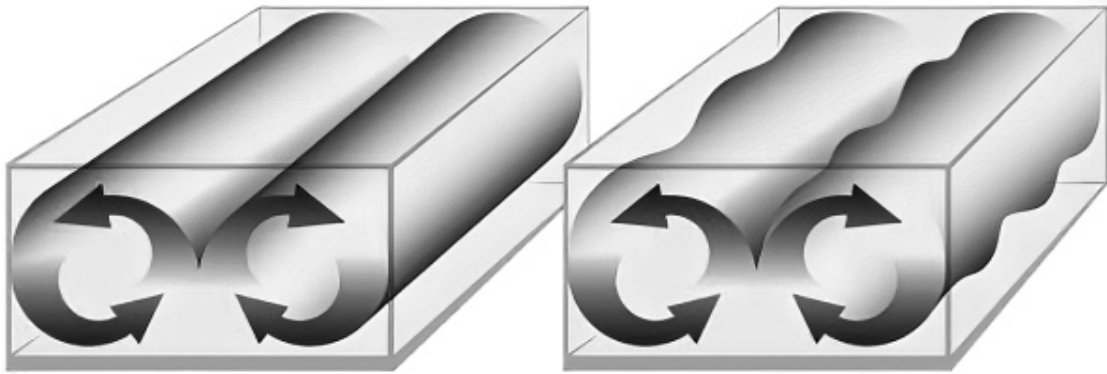
³⁹ «The predictability of hydrodynamic flow» // *Transactions of the New York Academy of Sciences*. 1963. Vol. 11:25:4. P. 409–432.

⁴⁰ Ibid. P. 410.

⁴¹ Этот набор из семи уравнений для описания конвекции был разработан Барри Сольцменом из Йельского университета, с которым Лоренц был знаком. Обычно уравнения Сольцмена описывают периодическое поведение, но, как заметил Лоренц, имелось одно исключение, при котором жидкость «отказывалась придти в состояние покоя». Тогда Лоренц понял, что значение четырех из уравнений в ситуации хаоса сводится к нулю, поэтому их можно не учитывать. Saltzman B. «Finite Amplitude Convection as an Initial Value Problem» // *Journal of the Atmospheric Sciences*. 1962. Vol. 19. P. 329.

дав за сосудом, можно проследить непрерывный цикл таких перемещений. Вне лабораторных стен сама природа создает области конвекции. К примеру, когда солнце нагревает песчаную поверхность пустыни, перемещающиеся воздушные массы могут сформировать миражи высоко в облаках или вблизи земли.

С дальнейшим ростом температуры поведение жидкости еще больше усложняется: в завитках зарождаются колебания. Уравнения Лоренца были слишком примитивными для их моделирования, описывая лишь одну черту, характерную для конвекции в природе, – кругообразное перемещение нагретой жидкости. В уравнениях учитывалась как скорость такого перемещения, так и теплопередача, и оба физических процесса взаимодействовали друг с другом. Когда любой циркулирующий объем горячей жидкости поднимается кверху, разогретое вещество приходит в контакт с более холодной субстанцией и теряет теплоту. Однако если движение жидкости происходит достаточно быстро, она не потеряет всю избыточную тепловую энергию к тому моменту, как достигнет верха и начнет опускаться по другой стороне вала. Эта жидкость может начать подталкивать систему к вращению в противоположном направлении⁴².



Движение жидкости (или газа). Когда жидкость нагревают снизу, в ней обычно образуются цилиндрические валы (*слева*). Горячая жидкость поднимается по одной стороне вала, отдает тепло и опускается по противоположной – наблюдается конвекция. Если жидкость нагревать сильнее (*справа*), возникнет нестабильность, влекущая за собой рябь в валах жидкости, бегущую в двух направлениях по всей длине цилиндров. При дальнейшем повышении температуры поток становится бурным и турбулентным.

Хотя система Лоренца не отражала полностью процесс конвекции, оказалось, что у нее были аналоги в реальном мире. К примеру, уравнения Лоренца достаточно точно описывают функционирование динамо-машины, уже вышедшей из употребления предшественницы современных генераторов, где электрический ток течет через диск, вращающийся в магнитном поле. При определенных условиях динамо-машина может дать обратный ход. Некоторые ученые, ознакомившись с уравнениями Лоренца, предположили, что, быть может, поведение динамо-машины прольет свет на другой специфический феномен – инверсию магнитного поля Земли⁴³. Известно, что так называемое геодинамо меняло свое направление много раз за земную историю⁴⁴. Интервалы между этими явлениями казались странными и необъяснимыми.

⁴² Появление конвективных валов в жидкости из уравнений Навье – Стокса, непрерывности и теплопроводности подробно описано в монографии Ланда П. С. *Нелинейные колебания и волны*. М: Либроком, 2010.

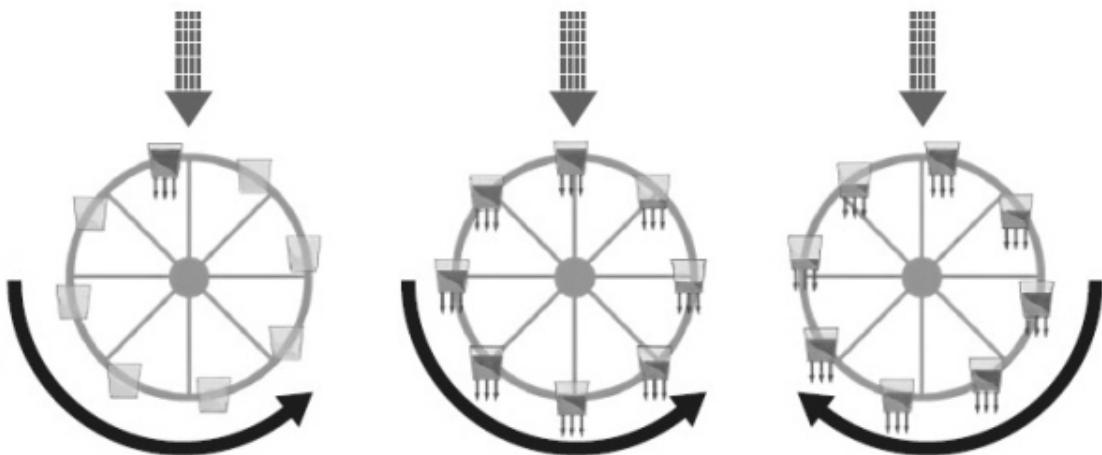
⁴³ Подобную модель можно найти в статье: Cook A. E., Roberts P. H. «The Rikitake twodisc dynamo system» // *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*. 1970. Vol. 68. P. 547–569.

⁴⁴ Малкус; хаотичность магнитного поля Земли до сих пор остается горячо обсуждаемой темой, и некоторые ученые продолжают искать объяснения этому явлению, в том числе не исключая возможности внешнего воздействия, например потоков воздуха, идущих от огромных метеоритов. Одно из первых предположений, что изменения обусловлены хаосом, встроенным в саму систему, см.: Robbins K. A. «A moment equation description of magnetic reversals in the earth» // *Proceedings of the National*

Столкнувшись с подобной беспорядочностью, теоретики, как правило, искали решение за рамками конкретной системы, выдвигая предположения вроде столкновения с метеоритами. Но возможно, геодинамо обладает своим собственным хаотическим поведением.

Другой системой, вполне точно описываемой уравнениями Лоренца, является водяное колесо определенного типа, механический аналог вращающихся конвекционных кругов⁴⁵. Вода непрерывно льется с вершины колеса в емкости, закрепленные на его ободе, откуда вытекает дальше через небольшие отверстия. В том случае, когда поток воды мал, верхняя емкость заполняется недостаточно быстро для преодоления трения. Если же скорость водяной струи велика, колесо начинает поворачиваться под весом жидкости. При достаточном напоре колесо станет непрерывно вращаться. При еще большей скорости струи емкости будут успевать заполниться до краев и вода из них не успеет вылиться за время движения вниз. Поднимаясь вверх, своей тяжестью они станут замедлять вращение, в результате колесо может остановиться и начать вращаться в противоположном направлении.

Интуиция физика, еще не столкнувшегося с хаосом, подсказывала Лоренцу, что за длительный период времени при неизменном потоке воды система придет в устойчивое состояние. Колесо будет или равномерно вращаться, или постоянно через определенные неизменные промежутки времени менять направление вращения, крутясь сначала вперед, затем назад. Однако Лоренц обнаружил, что это не так.



Водяное колесо Лоренца. Первая хаотическая система, обнаруженная Эдвардом Лоренцем, точно соответствует механическому устройству – водяному колесу, которое может вести себя удивительно сложным образом. Вращающееся колесо имеет те же свойства, что и вращающиеся в процессе конвекции цилиндры жидкости: колесо похоже на их поперечные сечения. Обе системы непрерывно подстегиваются потоком – воды или теплоты, – и обе рассеивают энергию. Жидкость утрачивает теплоту; вода выливается из черпаков колеса. Долгосрочное поведение обеих систем зависит от того, насколько велика управляющая ими энергия. Вода наливается сверху с постоянной скоростью. Если скорость ее небольшая, верхний черпак никогда не становится полным, трение не преодолевается и колесо не поворачивается. (Подобное явление наблюдается и в жидкости: если теплоты недостаточно, чтобы преодолеть вязкость, жидкость останется неподвижной.) С увеличением скорости водяного потока колесо начинает двигаться под тяжестью верхнего черпака (*слева*) и даже вращаться с постоянной скоростью (*в центре*). Однако при чрезмерной скорости воды (*справа*) вращение колеса может стать хаотичным из-за нелинейных воздействий, появившихся в системе. Черпаки, проходя под водяным

Academy of Science. 1976. Vol. 3. P. 4297–4301.

⁴⁵ Малкус.

потоком, наполняются в зависимости оттого, насколько быстро вращается колесо. При быстром вращении колеса им не хватает времени, чтобы наполниться. (Так же и жидкости в быстровращающихся конвекционных завитках недостает времени, чтобы поглотить тепло.) Кроме того, емкости могут начать двигаться в обратную сторону, не успев лишиться всей воды. В результате полные черпаки на движущейся вверх стороне колеса способны замедлить вращение всей системы, а затем вызвать ее поворот в обратную сторону. Фактически Лоренц обнаружил, что в течение длительных периодов времени вращение может менять свое направление несколько раз, никогда не обретая постоянной скорости и никогда не повторяясь каким-либо предсказуемым образом⁴⁶.

Три уравнения с тремя переменными полностью описывали движение данной системы⁴⁷. 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, запись поведения системы. Эта линия могла прийти в какую-то точку и там остановиться, что соответствовало бы достижению равновесия, при котором скорость и температура оставались постоянными. 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. Система демонстрировала своего рода бесконечно сложное поведение. Траектория всегда оставалась ограниченной, но никогда не повторялась. Изгибы линии приобретали странные, но весьма характерные очертания, похожие на два крыла бабочки или на двойную спираль в трехмерном пространстве. И эта форма свидетельствовала о полной неупорядоченности, поскольку ни одна из точек или их комбинаций не повторялась. Но эта же форма свидетельствовала и о новом типе порядка.

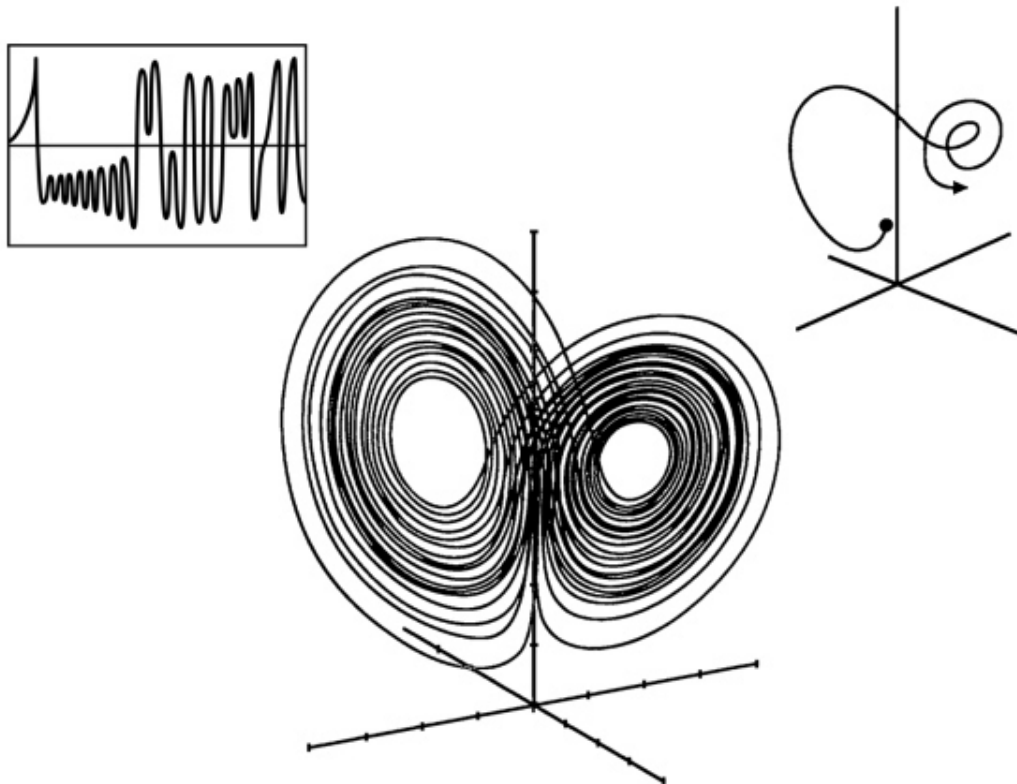
Спустя годы физики все еще обсуждали публикацию Лоренца – «эту замечательную, необыкновенную статью!», – и в их взгляде появлялась задумчивость. О его работе говорили так, словно она представляла собой древний манускрипт, хранивший секреты вечности. Из тысяч статей, составивших специальную литературу по проблеме хаоса, вряд ли какая-либо цитировалась чаще, чем «Детерминированное непериодическое течение» Лоренца⁴⁸. Многие годы ни один феномен не изображался столь бесчисленное количество раз, ни об одном не сняли столько фильмов, сколько о таинственной кривой, описанной в этой главе, – двойной спирали, известной как «аттрактор Лоренца».

Она воплощала в себе сложность и запутанность, все многообразие хаоса.

⁴⁶ Подобное вращение можно наблюдать на видео: www.youtube.com/watch?v=Gu50alrmzNA.

⁴⁷ Эта классическая модель, обычно называемая системой Лоренца, выглядит так: $dx/dt = 10(y - x)$, $dy/dt = -xz + 28x - ydz/dt = xy - (8/3)z$. С момента ее появления в «Deterministic Nonperiodic Flow» система Лоренца много исследуется; см., например, авторитетную техническую работу: Sparrow C. *The Lorenz Equations, Bifurcations, Chaos, and Strange Attractors*. Springer-Verlag, 1982.

⁴⁸ См. русский перевод: Лоренц Э. «Детерминированное непериодическое течение» // *Странные аттракторы*. М.: Мир, 1981. С. 88–117. – Прим. науч. ред.



Аттрактор Лоренца. Это магическое изображение (*внизу*), напоминающее маску совы или крылья бабочки, стало эмблемой первых исследователей хаоса. Оно раскрывает тонкую структуру, таящуюся в беспорядочном потоке информации. Традиционно изменение значений какой-либо переменной графически изображалось в виде так называемого временного ряда (*вверху*). Чтобы продемонстрировать меняющееся соотношение между тремя переменными, потребовался другой способ графического представления. В каждый момент времени три переменных задают положение точки в трехмерном пространстве; по мере изменения системы перемещение точки описывает непрерывное изменение переменных. Поскольку состояние системы никогда точно не повторяется, траектория не пересекает сама себя, образуя лишь новые и новые петли. Движение по аттрактору абстрактно, тем не менее оно передает 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.

Но это во времена Лоренца ощущали немногие. Он рассказал о своих опытах Виллему Малкусу, профессору прикладной математики Массачусетского технологического института, который слыл человеком весьма тактичным и способным оценить по достоинству работу коллег. В ответ Малкус, рассмеявшись, произнес: «Эд, мы знаем, знаем доподлинно, что в жидкости ничего подобного не происходит из-за конвекции»⁴⁹. По его мнению, вся сложность со временем загасится и система перейдет к установившемуся, регулярному движению.

«Конечно, мы упустили самую суть, – повторял Малкус спустя несколько десятилетий, когда в его полуподвальной лаборатории появилось настоящее, созданное для посрамления скептиков водяное колесо Лоренца. – Эду был чужд язык традиционной физики. Его мысль работала в границах некой обобщенной абстрактной модели, которая демонстрировала поведение, характерное, как он интуитивно чувствовал, для определенных аспектов внешнего мира.

⁴⁹ Малкус, Лоренц.

Он ощущал нечто, но не мог передать нам свои ощущения. Сейчас мы наконец поняли, как безраздельно владели Лоренцем его идеи».

В те времена лишь немногие сознавали, что отдельные области знания все сильнее изолируются друг от друга. Биологам было что читать и без книг по математике; более того, молекулярные биологи не отвлекались на чтение статей по популяционной биологии. Физикам не хватало времени штудировать метеорологические журналы. Только некоторые математики оценили открытие Лоренца, и еще целых десять лет физики, астрономы и биологи открывали уже открытое. В конце концов, Лоренц был метеорологом, и никому не приходило в голову искать первое описание феномена хаоса на сто тридцатой странице двадцатого выпуска *Journal of the Atmospheric Sciences*⁵⁰.

⁵⁰ «Deterministic Nonperiodic Flow» в середине 1960-х в научном сообществе цитировалась с периодичностью раз в год, а двумя десятилетиями позже – больше чем сто раз в год.

Глава 2

Революция

Конечно, нужно напрячься, Чтобы выйти за границы того, Что называют статистикой.

Стивен Спендер

Свежее видение. Маятник, «космические шары» и качели на детской площадке. Изобретение «подковы». Загадка разгадана: Большое красное пятно на Юпитере.

Историк науки Томас Кун рассказывает о занимательном эксперименте, проведенном двумя психологами в 1940-х годах⁵¹. Испытуемым одну за другой показывали игральные карты и просили их назвать. Конечно, в эксперименте была небольшая хитрость: 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 не замечали ничего странного. Посмотрев на красную шестерку пик, они определяли ее как шестерку червей или как 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.

В конце концов, получив возможность хорошенько рассмотреть каждую карту, большинство разгадало, в чем подвох, и сыграло партию без ошибок. Однако некоторые участники опыта, так и не раскрывшие обмана, совершенно потерялись, испытывая при этом настоящую муку. «Какой бы ни была эта масть, я не могу ее определить, – жаловался один. – То, что мне сейчас показали, вообще не похоже на игральную карту. Я не знаю, какого цвета изображение, и не уверен, пики это или черви. Сейчас я уже не могу в точности сказать даже, как выглядят пики... О господи!»⁵²

Профессиональные исследователи, схватывающие смутные, быстро мелькающие картины жизни природы, в не меньшей степени склонны испытывать страдания и смятение, когда встречаются с чем-то странным. И когда эти странности меняют то, каким образом ученые смотрят на мир, происходят самые важные открытия. Таково мнение Куна, и история хаоса его подтверждает.

В 1962 году, когда появились первые публикации Куна о том, как работают ученые и как происходят научные революции, они были встречены со смесью враждебности и восторженности, и споры вокруг них не утихают до сих пор. Кун весьма скептически отзывался о традиционных воззрениях на прогресс в науке – что тот якобы совершается за счет накопления знаний, дополнения старых открытий новыми и возникновения новых теорий под влиянием

⁵¹ Предложенное Куном понимание научной революции широко критиковалось и обсуждалось спустя четверть века после того, как он его высказал, примерно в то время, когда Лоренц пытался построить с помощью компьютера первые погодные модели. В рассказе о взглядах Куна я полагался в первую очередь на его работу: *The Structure of Scientific Revolutions*, 2nd ed. enl. Chicago: University of Chicago Press, 1970; а также: *The Essential Tension: Selected Studies in Scientific Tradition and Change*. Chicago: University of Chicago, 1977; «What Are Scientific Revolutions?» // *Occasional Paper*. No. 18. Center for Cognitive Science, Massachusetts Institute of Technology; и интервью с Куном. Еще один полезный и важный источник, который содержит размышления о предмете: Cohen I. B. *Revolution in Science*. Cambridge, Mass.: Belknap Press, 1985.

⁵² *Structure*. P. 62–65, со ссылкой на: Bruner J. S., Postman L. «On the Perception of Incongruity: A Paradigm» // *Journal of Personality*. 1949. Vol. XVIII. P. 206.

вскрытых экспериментами фактов. Кун 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 поставленных вопросов внутри своих дисциплин, и исключительными, неординарными работами, порождающими революции. Неслучайно в его представлениях ученые не казались идеальными рационалистами.

По мнению Куна, обычная наука состоит преимущественно из действий улучшающего характера⁵³. Экспериментаторы оттачивают методику постановки опытов, проделанных уже не один раз до них⁵⁴. Теоретики то добавляют кирпичик в стену познания, то слегка изменяют ее контур. И вряд ли дела могут обстоять иначе. Если бы все ученые начинали с нуля, подвергая сомнениям базовые предположения, то им стоило бы огромных трудов достичь того уровня, который необходим для выполнения действительно полезной работы. Во времена Бенджамина Франклина горстка энтузиастов в попытке постичь природу электричества могла – и должна была – выдвигать свои собственные основополагающие принципы⁵⁵. Один из этих ученых считал притяжение наиболее важным действием электричества, принимая последнее за своего рода «испарение», исходящее от всевозможных субстанций. Другой полагал, что электричество подобно жидкости, передаваемой материалом-проводником. И все они без особых затруднений объяснялись как с обывателями, так и между собой, поскольку тогда еще не был выработан общий для всех, специальный язык для описания объекта исследования. А вот исследователь XX века, изучающий динамику жидкости, не смог бы совершить открытия, не имея в своем распоряжении специальной терминологии и математического аппарата. Но взамен, сам того не ощущая, он терял возможность ставить под сомнения первоосновы своей науки.

Кун видит в обычной науке средство решения задач, с которыми студенты сталкиваются, впервые открыв учебник. Задачи эти сопровождают большинство ученых в магистратуре, при работе над диссертацией, при написании статей для научных журналов (необходимый элемент успешной академической карьеры). «В обычных условиях ученого-исследователя нельзя назвать новатором. Он лишь решает головоломки, причем именно те, которые, по его мнению, могут быть сформулированы и решены в рамках существующей научной традиции», – пишет Кун⁵⁶.

Но случаются и революции, 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 специализации. Занимающие их вопросы не рассматриваются как допустимые направления исследований, их диссертации отклоняют, а в публикации статей отказывают. Да и сами ниспровергатели не уверены, что смогут распознать решение, даже увидев его. Но они готовы рискнуть карьерой. Немногочисленные вольнодумцы работают в одиночку, они не способны даже самим себе внятно объяснить направление своих изысканий и опасаются рассказывать о них своим коллегам – таков романтический образ, рисуемый Куном. И этот образ не раз встречался в реальной жизни в области исследований хаоса.

Ученые, первыми обратившие внимание на феномен хаоса, могли многое поведать о неодобрении и даже об открытой враждебности, с которой они подчас сталкивались. Аспирантов убеждали не писать диссертаций по неизвестной дисциплине, о которой их руководителям мало что известно: подобное поставит под удар всю карьеру. Исследователь, занимавшийся физикой элементарных частиц, прослышав о новой математике, начинал сам с ней экспери-

⁵³ Structure. P. 24.

⁵⁴ Tension. P. 229.

⁵⁵ Structure. P. 13–15.

⁵⁶ Tension. P. 234.

ментировать, думая о ее красоте – и сложности, однако при этом чувствовал, что никогда не сможет рассказать об этом коллегам⁵⁷. Почтенные профессора, шагнув за пределы общепринятых научных изысканий и ощутив непонимание, а зачастую и просто негодование собратьев по цеху, пугались, что переживают возрастной кризис. Но испуг отступал перед искушением пережить волнение, порождаемое действительно неизведанным. Даже люди, не принадлежавшие к академическим кругам, но воспринимавшие перемены с энтузиазмом, обнаруживали в себе это чувство. Для Фримена Дайсона, в 1970-е годы работавшего в Институте перспективных исследований, соприкосновение с хаосом стало «чем-то вроде электрического шока». Другие же ученые просто понимали, что впервые за всю свою сознательную жизнь в науке они становятся свидетелями настоящей смены парадигмы, переворота в мышлении.

Специалисты, сразу признавшие за хаосом право на существование, бились над тем, как облечь свои открытия и размышления в подходящую для публикаций форму, поскольку работа велась на стыке дисциплин. Она казалась слишком абстрактной для физики и чересчур экспериментальной для математики. Препятствия на пути распространения новых веяний и яростное сопротивление традиционных школ кое-кто воспринял как свидетельство истинно революционного характера зарождавшейся науки. Поверхностные идеи усваиваются легко, но идеи, которые требуют пересмотреть представления о мире, вызывают враждебность. Джозеф Форд, физик из Технологического института Джорджии, нашел подтверждение этого 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»⁵⁸.

Многим представителям основных направлений науки новая дисциплина виделась весьма смутно. Некоторые, особенно исследователи динамики жидкостей, придерживавшиеся традиционных воззрений, отзывались о ней довольно резко. На первый взгляд утверждения теории хаоса выглядели дикими и ненаучными. К тому же они базировались на математическом аппарате, который казался необычным и сложным.

Однако, по мере того как adeptов хаоса становилось все больше, некоторые факультеты относились к ним неодобрительно – но были и те, что им благоволили. Некоторые научные журналы взяли за неписаное правило не публиковать работ о хаосе – но другие, напротив, печатали исключительно статьи, посвященные новой дисциплине. «Хаотистов» (их называли и так) стали выдвигать на получение престижных ежегодных стипендий и премий⁵⁹. К середине 1980-х годов расслоение в академической среде привело к тому, что приверженцы хаоса заняли весьма значительные административные посты в высших учебных заведениях. Так были созданы центры и институты, специализирующиеся на «нелинейной динамике» или «сложных системах»⁶⁰.

⁵⁷ Свитанович.

⁵⁸ Форд, интервью, а также: «Chaos: Solving the Unsolvable, Predicting the Unpredictable» // *Chaotic Dynamics and Fractals* / Ed. by M. F. Barnsley and S. G. Demko. New York: Academic Press, 1985.

⁵⁹ Но Майкл Берри отмечает, что в Оксфордском словаре есть редко употребляемое слово «хаология», которое означает «историю или описание хаоса». Berry M. «The Unpredictable Bouncing Rotator: A Chaology Tutorial Machine», preprint, H. H. Wills Physics Laboratory, Bristol.

⁶⁰ Рихтер.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.