

Открытие странных аттракторов

<David Ruel. Hasard et Chaos. Princeton University Press, 1991
Давид Рюэль. Случайность и хаос. Издательство РХД, Ижевск, 2001>

Два слова о моих коллегам-ученым: некоторые из них будут огорчены моим далеко не восторженным описанием ученых и мира исследований. На этот счет я не приношу никаких извинений: если наука — это изучение истины, то разве не должен человек быть столь же правдив и в отношении того, как она делается? ...

Турбулентность легко увидеть, но сложно понять. Анри Пуанкаре размышлял о предмете гидродинамики и даже преподавал курс по вихрям, но не рискнул создать теорию турбулентности. Немецкий физик Вернер Гейзенберг, основатель квантовой механики, предложил теорию турбулентности, которая так и не получила всеобщего принятия. В свое время говорили, что «турбулентность — это кладбище теорий». Безусловно, как в физику, так и в математику движения жидкости значительный вклад внесли такие люди, как Осборн Рейнольдс, Джеффри Тейлор, Теодор фон Карман, Жан Лере, А. Н. Колмогоров, Роберт Крайчнан и другие; но данный предмет, судя по всему, не раскрыл все свои тайны.

... Мне бы хотелось рассказать об одном эпизоде научных изысканий, направленных на понимание турбулентности и более поздней теории хаоса. Я сам принимал в нем участие, так что могу предоставить больше де талей, чем в случае с событиями, в которых участвовали полумифические гиганты науки начала века. Я попытаюсь дать вам представление об атмосфере исследования, но не стану приводить сбалансированный исторический отчет. Что касается последнего, то читатель может найти его в оригинальных работах, многие из которых для удобства были собраны в два специально изданных тома.

Открытие новых идей запрограммировать невозможно. Вот почему революции и другие общественные катаклизмы зачастую оказывают положительное влияние на науку. На некоторое время прерывая рутинную работу бюрократического аппарата и выводя из строя организаторов научного исследования, они дают людям возможность думать. Как бы то ни было, события, которые произошли во французском обществе в мае 1968 года, обрадовали меня, потому что они нарушили работу почты и связи и, помимо этого, создали своего рода интеллектуальное возбуждение. В то время я пытался самостоятельно изучить гидродинамику по книге Ландау и Лифшица «Механика жидкости». Я медленно пробивал свой путь в гуще сложных вычислений, от которых авторы, судя по всему, получали истинное удовольствие, и внезапно наткнулся на нечто интересное: раздел по возникновению турбулентности, без сложных вычислений.

Ландау предположил, что, когда под действием внешнего источника питания жидкость приходит в движение, возбуждается определенное количество мод жидкости. Если не возбуждается ни одной моды, мы имеем постоянное состояние жидкости. Если возбуждается одна мода, мы имеем периодические колебания. Если возбуждается несколько мод, поток становится нерегулярным, а при возбуждении множества мод — турбулентным. Ландау поддержал свое предположение с помощью математических доказательств, которые я не в состоянии здесь воспроизвести. (Независимо от Ландау, немецкий математик Эберхард Хопф опубликовал подобную теорию, несколько более сложную в математическом плане.) Говоря о физических экспериментах, можно провести временной анализ изменений частоты колебания турбулентной жидкости, т. е. поискать, какие частоты присутствуют. При этом обнаруживается, что имеет место

множество частот — фактически целый континуум частот, — что, следовательно, должно соответствовать очень большому количеству мод жидкости.

Теория Ландау - Хопфа, в представленном мной виде, на первый взгляд, дает удовлетворительное описание *возникновения турбулентности*: то, как жидкость становится турбулентной при увеличении силы, приложенной к ней извне. И все же, читая объяснение Ландау, я мгновенно испытал неудовлетворение, по математическим причинам, которые я поясню очень скоро.

Описание турбулентности Ландау через моды не понравилось мне потому, что я слушал семинары Рене Тома и изучал фундаментальный труд Стива Смейла под названием «Дифференцируемые динамические системы». Француз Рене Том и американец Стив Смейл — выдающиеся математики. Первый является моим коллегой в Институте высших научных исследований (Institut de Hautes Etudes Scientifiques) недалеко от Парижа, а последний частенько туда приезжает. От них я узнал о современном развитии идей Пуанкаре по динамическим системам, из чего ясно понял, что применимость парадигмы мод далека от универсальной. Например, временная эволюция, которую можно описать через моды, не может обладать чувствительной зависимостью от начальных условий. Я докажу это утверждение в следующей главе, где покажу, что временная эволюция, описанная через моды, достаточно скучна по сравнению с временной эволюцией, рассмотренной Смейлом. Чем больше я думал об этой проблеме, тем меньше я верил картине Ландау: если бы в вязкой жидкости были моды, то они взаимодействовали бы скорее сильно, чем слабо и создавали бы нечто совершенно отличное от картинки мод. Нечто более богатое и гораздо более интересное.

А что делает ученый, когда считает, что он открыл что-то новое? Он пишет работу, статью на зашифрованном научном жаргоне, которую потом посылает редактору научного журнала, чтобы тот решил вопрос о ее публикации. Редактор использует одного или двух своих коллег в качестве «рецензентов» статьи, и если ее принимают, то ее, в конце концов, печатают в данном научном журнале. Не ищите таких журналов в своем газетном киоске — их там не продают. Их рассылают по почте ученым, они заполняют шкафы в кабинетах профессоров университета, а в крупных научных библиотеках простираются целые мили полок с этими журналами.

Написание статьи под заголовком «О природе турбулентности» было рискованным начинанием, которое я предпринял вместе с Флорисом Такенсом, голландским математиком, который вложил в него свой математический опыт и не побоялся высунуться, написав работу по физике. В своей работе мы объяснили, почему, на наш взгляд, картина турбулентности, представленная Ландау, неверна, и предложили нечто другое, что содержало *странные аттракторы*. Эти странные аттракторы впервые появились в работе Стива Смейла, но само название было новым, и теперь уже никто не помнит, кто его придумал: Флорис Такенс, я или кто-то еще. Мы отправили свою рукопись в подходящий научный журнал, и вскоре она вернулась: ее не приняли. Редактору наши идеи не понравились, и он предложил нам обратиться к его собственным работам, чтобы мы узнали, что же такое турбулентность на самом деле.

... В конце концов, эта статья была опубликована в научном журнале. (На самом деле редактором этого журнала был я, и я сам принял статью для публикации. В общем, такая процедура не рекомендуется, но я чувствовал, что в данном случае мой поступок оправдан.) Статья «О природе турбулентности» содержит некоторые идеи, схожие с теми, что ранее развивали Пуанкаре и Лоренц (мы этого не знали). Но нас не интересовали движения атмосферы и их важность для прогнозов погоды. Вместо этого у нас было что сказать об общей

проблеме гидродинамической турбулентности. Мы претендовали на то, что турбулентный поток описывается *не* суперпозицией множества мод (как предлагали Ландау и Хопф), а *странными аттракторами*.

Ученые пишут научные статьи, но, кроме этого, они также рекламируют свои идеи и результаты, выступая с научными лекциями, которые часто называют «семинарами». Дюжина коллег, когда больше (когда меньше), собираются вместе и в течение часа сидят, слушая оратора и глядя на уравнения и диаграммы. Некоторые что-то записывают или делают вид, что записывают, а в действительности работают над своими проблемами. Некоторые кажутся спящими, но внезапно просыпаются, задавая острый вопрос. Многие семинары невразумительны до безнадежности, потому что примерно через полчаса после начала выступления оратор понимает, что в самом начале забыл сказать что-то очень существенное, или потому что она совершенно запуталась в своих вычислениях, или потому что он выражает свои идеи на балканском или азиатском английском, который, кроме него самого, не понимает никто. Но при всем этом семинары образуют самое сердце научной деятельности. Некоторые из них просто блестящи и абсолютно ясны, другие — вылизаны до блеска, но скучны, а третьи, которые неспециалистам показались бы настоящим бедствием, на самом деле представляют существенный интерес.

После того как мы с Такенсом закончили писать свою статью по турбулентности, я выступал с рядом лекций по этой и более поздней моей работе в американских университетах и исследовательских институтах. (Во время академического 1970-1971 года я посетил Институт перспективных исследований в Принстоне.) Прием можно назвать смешанным, но в целом достаточно холодным. Я помню, как после семинара, с которым он пригласил меня выступить, физик Ч. Янг пошутил о моих «противоречивых идеях по турбулентности» — точное описание ситуации, которая сложилась в то время.

В чем же заключалась причина тревоги физиков? Дело, видимо, в том, что, когда жидкость постепенно возбуждается под действием возрастающих сил, приложенных извне, принятая теория предсказывает постепенное увеличение числа независимых частот, присутствующих в жидкости. Предсказание же странного аттрактора выглядит совершенно иначе: должен возникать континуум частот. На самом деле, разницу можно проверить, проведя частотный анализ какого-нибудь сигнала, созданного умеренно возбужденной жидкостью. Численное изучение провел Пол Мартин в Гарварде. Кроме того, Джерри Голлаб и Гарри Свинней в Сити Колледж, Нью-Йорк, поставили эксперимент. В обоих случаях полученные результаты говорили скорее в пользу картины возникновения турбулентности, описанной Рюэлем-Такенсом, нежели Ландау - Хопфом.

Это стало переломным моментом. В то время, конечно же, это признали не все, но после эксперимента Голлаба и Свиннея прежде противоречивые идеи мало-помалу стали интересными, а потом и хорошо известными. Сначала несколько, а потом много физиков и математиков начали работать над странными аттракторами и чувствительной зависимостью от начальных условий. Была признана важность идей Эдварда Лоренца. Возникла новая парадигма, которая получила имя — хаос, — данное ей Джимом Йорке, прикладным математиком, работающим в университете Мэриленда. То, что мы сейчас называем хаосом, является временной эволюцией с чувствительной зависимостью от начальных условий. Таким образом, движение странного аттрактора является хаотическим. Кроме того, можно говорить о *детерминистическом шуме*, когда наблюдаемые нерегулярные колебания кажутся шумными, но механизм, их создающий, является детерминистическим.

На фоне теории хаоса, благодаря своей особой красоте и значимости, особенным образом выделяется один результат — каскад удвоений периода, открытый Фейгенбаумом. Не вдаваясь в технические подробности, я попытаюсь дать представление об открытии Митчелла Фейгенбаума. При изменении сил, действующих на физическую динамическую систему, часто можно наблюдать удвоение периода. Периодическая орбита заменяется другой, близкой ей, но такой, что для возвращения в исходную точку необходимо обойти эту орбиту дважды. Таким образом, время, необходимое для возвращения в исходную точку, — называемое периодом — примерно удваивается. Удвоение периода наблюдается при определенных экспериментах с конвекцией: жидкость, нагретая снизу, подвергается некоторому периодическому движению; изменение же места нагревания создает другой тип периодического движения, период которого удваивается.

Один интересный аспект каскада удвоений периода состоит в том, что когда вы заметите его в ходе эксперимента, то не спутаете ни с чем другим. Кроме того, известно, что за каскадом существует хаос. Следовательно, наблюдение каскада Фейгенбаума в гидродинамике является особенно убедительным доказательством того, что моды должны уступить хаосу.

Я позабыл сказать одну вещь. Когда Митчелл Фейгенбаум представил свою работу по каскаду удвоений периода для публикации в научном журнале, ему отказали. Но потом он нашел более просвещенного редактора, который принял ее в другой журнал.

Позвольте мне сделать небольшое отступление в прошлое и показать, как я сам столкнулся с хаосом. Я знал, что некоторые химические реакции протекают во времени колебательным образом и что подобные колебания в химических системах биологического происхождения описывали в своей работе Кендалл Пай и Бриттон Чанс. Поэтому в начале 1971 года я отправился в Филадельфию, где встретился с профессором Чансом и группой его соратников и объяснил им, почему они могут ожидать увидеть непериодические «турбулентные» колебания, равно как и периодические. К сожалению, «математический эксперт» группы выразил негативное мнение, и Чанс не воспринял мою идею. Когда впоследствии я обсудил тот же вопрос с Паем, тот выразил большее сочувствие, но объяснил, что если бы он следил за реакцией и обнаружил не периодическую, а «турбулентную» запись, то объявил бы эксперимент неудавшимся, разорвал бы пленку и выбросил бы ее в корзину для бумаг. Эта прошлая история показывает, как «хаос» воздействовал на науку. Сейчас, когда получается турбулентная или хаотическая запись, ее признают именно в качестве таковой и тщательно изучают.

Я обобщил свои идеи по химическим реакциям в небольшой статье, которую представил для публикации в научный журнал. Мне отказали, но впоследствии эту статью напечатал другой журнал. Позднее ученые наблюдали хаотические химические реакции, которые фактически привели к первому явному воссозданию экспериментального странного аттрактора группой химиков из Бордо.

Через несколько лет после всего, что я только что описал, хаос вошел в моду, и по этой теме начали организовывать международные конференции. Затем хаос удостоили титула нелинейной науки и для его изучения начали создавать различные институты. Появились новые научные журналы, которые целиком и полностью посвящались нелинейной науке. Успешная история хаоса приняла масштабы мыльного пузыря, так что все ученые, работающие в этой области, должны были прыгать от радости. Некоторые действительно прыгают, другие — нет. Я попытаюсь объяснить почему.

В наше время мода играет важную роль в социологии — а также в финансировании — физики и других наук (математика от этой тенденции

относительно избавлена). Узкоспециализированная тема (как-то: хаос, теория струн, высокотемпературные сверхпроводники) на несколько лет входит в моду, а потом о ней забывают. Но пока эта область в моде, ее просто наводняют толпы людей, которых привлекают не сами идеи, а достигнутые успехи, что изменяет интеллектуальную атмосферу в худшую сторону.