

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава 1. Шесть эпох неопределенности.	6
Глава 2. Гадание по внутренностям	21
Глава 3. Метание игральных костей	33
Глава 4. Подбрасывание монеты	44
Глава 5. Слишком много информации	58
Глава 6. Ошибки и парадоксы	80
Глава 7. Социальная физика	98
Глава 8. Вы уверены?	115
Глава 9. Закон и беспорядок	132
Глава 10. Не предсказывая предсказуемое	147
Глава 11. Фабрика погоды	165
Глава 12. Лечебные мероприятия	194
Глава 13. Финансовые предсказания	210
Глава 14. Наш байесовский мозг	228
Глава 15. Квантовая неопределенность	248
Глава 16. Играют ли кости роль Бога?	269
Глава 17. Применение неопределенности	299
Глава 18. Неизвестные неизвестные	317
Примечания	323
Иллюстрации	335
Указатель	336

ШЕСТЬ ЭПОХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Неопределенность: состояние, в котором человек не обладает точным знанием или полной ясностью; сомнения или колебания.

Оксфордский словарь английского языка

НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬ — ЭТО НЕ ОБЯЗАТЕЛЬНО ПЛОХО. Приятные сюрпризы нам нравятся. Некоторые из нас не прочь попытаться счастья на скачках, да и большинство спортивных состязаний потеряли бы смысл, знай мы заранее, кто победит. Иногда будущие родители *не* хотят, чтобы им объявили, кто родится — мальчик или девочка. Я подозреваю, что многие не хотели бы заранее знать дату собственной смерти, не говоря уж о том, как эта смерть произойдет. Но все это исключения. Жизнь — это лотерея. Неопределенность рождает сомнения, мы чувствуем себя не в своей тарелке, а потому хотим уменьшить или вовсе исключить неопределенность. Мы беспокоимся о том, *что случится*. Мы следим за прогнозами погоды, хотя ее непредсказуемость уже стала притчей во языцех и прогнозы часто оказываются ошибочными.

Мы узнаем новости по телевизору, или читая газету, или путешествуя по интернету. Поразительно, как далеко простираются те области, где мы не знаем, что произойдет. Падают самолеты. Землетрясения и вулканы опустошают города и села. Взлетают и падают биржевые курсы; и хотя мы говорим о циклах их взлетов и падений, на самом-то деле мы имеем в виду лишь то, что рост сменяется падением, а падение — ростом. Мы почти ничего не знаем о том, *когда*

одно сменит другое. Точно так же мы говорим о «циклах сухой и влажной погоды» и утверждаем, что предсказываем ее. Перед выборами мы следим за опросами общественного мнения, пытаюсь выяснить, у кого из кандидатов больше шансов на победу. В последние годы опросы кажутся менее надежными, но все равно они вселяют в нас надежду или обескураживают — как повезет.

Иногда мы не просто испытываем неуверенность — мы даже не понимаем, в чем именно мы не уверены. Изменения климата беспокоят многих, но крикливое меньшинство настаивает, что все это мистификации, нарочно измышленные учеными (которые не могли бы организовать мистификацию даже ради спасения собственной жизни), или китайцами, или на худой конец марсианами... — выберите свою любимую теорию заговора. Но даже климатологи, которые предсказывают изменение климата, очень мало могут сказать о том, в чем именно это изменение будет заключаться. Однако у них есть довольно четкое представление о его общей природе, и на практике этого более чем достаточно для того, чтобы бить во все колокола.

Мы не уверены не только в том, что нам готовит природа, мы не знаем даже того, что мы готовим себе сами. Мировую экономику все еще пошатывает после финансового кризиса 2008 года. Но люди, которые его спровоцировали, продолжают вести свои дела как ни в чем не бывало, так что, скорее всего, нас ждет еще более серьезное финансовое бедствие. Мы очень мало знаем о том, как предсказывать финансовую ситуацию в мире.

После периода относительной (и в исторической перспективе очень необычной) стабильности мировая политика еще сильнее раздроблена, и это расшатывает все давние устои. «Фейк ньюс» вплетают настоящие факты в поток дезинформации. Как и следовало ожидать, те, кто громче всех возмущается, больше других виновны в распространении лжи. Интернет, вместо того чтобы распространять знания, распространяет невежество и мракобесие. Убрав привратников, он оставил врата нараспашку.

Жизнь человеческого сообщества всегда была неупорядоченна, да и в науке старая идея о том, что природа подчи-

няется точным законам, уступила место более гибким представлениям. Мы можем найти правила и модели, которые приблизительно верны (причем в одних областях «приблизительно» означает «с точностью до десятого знака после запятой», а в других — «плюс-минус в десять раз больше или меньше»). Но они всегда временные и подлежат замене при появлении новых данных. Теория хаоса говорит нам, что даже если что-то *действительно* подчиняется жестким правилам, оно может все равно оставаться непредсказуемым. А квантовая теория утверждает, что где-то в глубине, на уровне мельчайших объектов, Вселенная *по природе своей* непредсказуема. Неопределенность — это не просто знак нашего незнания, это то, из чего соткан мир.

МЫ МОЖЕМ ОТНОСИТЬСЯ К БУДУЩЕМУ С ФАТАЛИЗМОМ — и будем не одиноки. Но большинству из нас такое отношение чуждо. Мы подозреваем, что оно приведет к катастрофе, что немного предусмотрительности — и катастрофу можно было бы предотвратить. Обычная человеческая тактика: столкнувшись с чем-нибудь неприятным, или противостоять этому, или изменить его. Но какие предупредительные меры предпринять, если мы даже не знаем, что может случиться? После катастрофы «Титаника» было принято решение снабдить корабли дополнительными спасательными шлюпками. И что же? Именно из-за веса дополнительных шлюпок перевернулся корабль «Истлэнд» на озере Мичиган, когда погибло 848 человек. Закон «хотели как лучше, а вышло как всегда» противостоит самым лучшим намерениям.

Будущее беспокоит нас, потому что мы животные, живущие во времени. Чувство времени в нас встроено, мы прогнозируем будущие события и действуем в соответствии с этими прогнозами. У нас нет машины времени, но часто мы действуем так, будто бы она есть, и будущее событие определяет наши действия еще до того, как произошло. Конечно, настоящая причина сегодняшних действий — это не завтрашние свадьба, гроза или счета на оплату. Мы *верим*, что они произойдут, и именно в этом настоящая причина наших действий. Наш мозг, отточенный эволюцией и обучением, помогает нам выбрать действие сегодня, чтобы

упростить жизнь завтра. Мозг — это машина для принятия решений на основе прогноза будущего.

Многие решения мозг принимает за доли секунды. Как баскетболист ловит мяч? Сначала зрительная система воспринимает образ мяча, и только после задержки, хотя совсем небольшой, мозг определяет его местоположение. Как правило, баскетболист успешно ловит мяч, потому что его мозг довольно хорошо предугадывает траекторию. Может случиться и так, что спортсмен пропускает сравнительно легкий мяч; это значит, что-то пошло не так: либо прогноз, либо реакция на него. Этот процесс подсознательный и, по-видимому, цельный, и мы даже не замечаем, что живем в мире, который на долю секунды опережает наш мозг.

Некоторые решения принимаются, когда мы строим планы на несколько дней, недель и месяцев вперед или даже несколько лет и десятилетий. Мы встаем в установленное время, чтобы сесть в автобус или метро и отправиться на работу. Мы покупаем еду на завтра или на неделю. Мы планируем семейную поездку на новогодние каникулы, и все причастные к этому действуют *сейчас*, чтобы подготовиться к тому, что будет *потом*. Состоятельные родители в Великобритании записывают своих детей в престижные школы еще до рождения. Люди сажают деревья, которые вырастут через столетия, так что наслаждаться прекрасным видом будут лишь их пра-пра-пра-пра-внуки.

Как мозг предсказывает будущее? Он строит упрощенные внутренние модели мира — того, как он работает, или может работать, или как предполагается, что он работает. Мозг подает то, что знает, в модель и наблюдает за результатом. Если мы видим незакрепленный ковер, одна из моделей предупредит нас об опасности: можно споткнуться и упасть с лестницы. Мы принимаем превентивные меры — закрепляем ковер в правильном положении. Не так важно, насколько правильным был прогноз. После того как мы закрепили ковер, негативный прогноз уже не может сбыться, потому что данные, введенные в модель, устарели. Тем не менее эволюция или личный опыт могут проверить модель и улучшить ее, когда мы узнаем, что происходит в подобных случаях, если ничего не предпринимать.

Такие модели не обязаны описывать устройство мира точно. Они лишь отражают наши *представления* о том, как он устроен. Так, за десятки тысяч лет человеческий мозг эволюционировал в машину, принимающую решения на основе представлений о том, к чему эти представления приведут. Поэтому не стоит удивляться способу наших предков справляться с неопределенностью: построить систему верований в сверхъестественных существ, которые управляют миром. Мы знали, что это не мы управляли им, а природа постоянно подбрасывала нам сюрпризы, часто неприятные, поэтому казалось разумным предположить, что есть *настоящие правители*: какие-то сверхчеловеческие существа — духи, призраки, боги, богини. Вскоре появился особый класс людей, которые утверждали, что могут ходатайствовать перед богами, чтобы помочь нам, смертным, достичь наших целей. Люди, которые утверждали, что предсказывают будущее, — пророки, провидцы, гадалки, оракулы — стали особенно ценными членами сообщества.

То была первая эпоха неопределенности. Мы изобретали системы верований, которые становились все более и более изощренными, потому что каждое поколение хотело сделать их еще великолепнее. Мы объяснили себе неопределенность природы как волю богов.

САМЫЙ РАННИЙ ЭТАП ОСОЗНАННЫХ отношений людей с неопределенностью длился тысячи лет. Эти отношения соответствовали действительности, потому что волей богов можно было беззастенчиво объявлять что угодно. Если боги были довольны, все было хорошо; если они злились, все шло наперекосяк. И правда, если с вами случилось что-то хорошее, то вы, очевидно, потрафили богам, а если случилось что-то плохое, то это вы сами виноваты, разозлив их. Так что верования в богов были тесно переплетены с моральными императивами.

Со временем все больше людей начали осознавать, что столь гибкие системы верований на самом деле *не объясняют* ничего. Если голубой цвет неба объяснять тем, что это боги все так устроили, то с тем же успехом оно могло бы быть розовым или пурпурным. Люди попытались мыслить о

мире иначе, основываясь на логических рассуждениях, которые поддерживаются (или нет) данными наблюдений.

Это уже была наука. Она объясняет голубой цвет неба рассеянием света на частицах мелкой пыли в верхних слоях атмосферы. Это не объясняет, почему голубое *выглядит голубым*; нейробиологи работают над этим вопросом, но наука никогда не утверждала, что ей известно все. Наука развивалась и добивалась все больших успехов, терпя по дороге ужасные неудачи, и со временем научила нас управлять некоторыми природными явлениями. Открытие связи между электричеством и магнетизмом в XIX веке — один из первых по-настоящему революционных примеров превращения науки в технологию, которая изменила жизнь почти всех людей на Земле.

Наука показала, что природа может быть менее неопределенной, чем нам кажется. Пути планет в небесах не объясняются прихотью богов: планеты, если не считать мелких отклонений из-за их взаимного влияния, движутся по строго эллиптическим орбитам. Мы можем рассчитать эти траектории, учесть эффект мелких отклонений и предсказать положение планеты на века вперед. А в наши дни — и на миллионы лет, при условии ограничений, налагаемых хаотической динамикой. Есть законы природы; мы можем их открыть и использовать, чтобы предсказать будущее. Неуютное чувство неуверенности сменилось верой в то, что большинство вещей можно объяснить, если только удастся выявить управляющие ими законы. Философы стали задумываться, не является ли вся Вселенная лишь реализацией этих законов в течение эонов¹ времени. Может быть, и свобода воли — это иллюзия, а мы с вами живем внутри огромного часового механизма.

Возможно, неопределенность — это просто временное невежество. Приложить еще немного сил и размышлений — и все станет ясно. Это была вторая эпоха неопределенности.

НАУКА ЗАСТАВИЛА НАС ИЗОБРЕСТИ эффективный способ количественно оценивать, насколько определенным или неопределенным является событие, — вероятность. Исследо-

¹ Эон — длительный период времени, состоящий из нескольких эр. — *Прим. ред.*

вание неопределенности стало новым разделом математики, и основная задача этой книги — изучить, какими способами мы применяем математику в стремлении сделать наш мир более определенным. В этом направлении работают и другие ветви культуры, такие как политика, этика и искусство, но я сосредоточусь на роли математики.

Теория вероятностей выросла из нужд и опыта двух очень разных групп людей: азартных игроков и астрономов. Игроки хотели лучше понимать шансы на выигрыш, а астрономам нужны были точные результаты наблюдений посредством несовершенных телескопов. Когда идеи теории вероятностей проникли в сознание людей, ее предмет покинул свои первоначальные рамки: теория вероятностей применяется теперь не только для азартных игр и вычисления орбит астероидов, но и для изучения фундаментальных физических принципов. Каждые несколько секунд мы вдыхаем кислород и другие газы. Огромное количество молекул, составляющих атмосферу, мечутся как крошечные бильярдные шары. Если бы все они скопились в одном углу комнаты, а мы в другом — это была бы беда. В принципе такое может случиться, но по законам вероятности настолько редко, что на практике это не происходит никогда. Воздух остается однородной смесью из-за второго закона термодинамики, который мы часто понимаем как утверждение, что Вселенная всегда становится более беспорядочной. Кроме того, второй закон парадоксально связан с направлением, в котором течет время. Это все очень глубокие вещи.

Термодинамика довольно поздно появилась на научной сцене. К тому времени теория вероятностей уже обосновалась в мире человеческих дел. Рождения, смерти, разводы, самоубийства, преступность, рост, вес, политика... Родилась прикладная ветвь теории вероятностей — статистика. Она дала мощные инструменты для анализа чего угодно: от эпидемии кори до предпочтений избирателей. Она пролила немного света, хотя и не так много, как хотелось бы, на сумеречный мир финансов. Она показала, что все мы дрейфуем в море вероятностей.

Теория вероятностей и ее прикладная ветвь — статистика — доминировали в третьей эпохе неопределенности.

ЧЕТВЕРТАЯ ЭПОХА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ворвалась к нам в начале XX века. До тех пор у всех форм неопределенности, с которыми мы сталкивались, была общая черта: неопределенность отражала наше незнание. Если мы не были в чем-то уверены, то лишь потому, что нам недоставало информации для предсказания. Вспомните о монетке — самом привычном символе случайности. А ведь монета — это очень простой механизм; механические системы детерминированы, и в принципе любой детерминированный процесс предсказуем. Если бы мы знали все силы, действующие на монету, ее начальную скорость и направление броска, как быстро она вращается и вокруг какой оси, — мы могли бы применить законы механики и рассчитать, какой стороной она упадет.

Новые открытия в фундаментальной физике заставили нас пересмотреть эту точку зрения. Может быть, для монет она и верна, но иногда нужная нам информация совершенно недоступна, потому что неизвестна даже самой природе. Около 1900 года физики начали понимать структуру вещества на микроуровне — уровне не только атомов, но и составляющих их субатомных частиц. Классическая физика, родившаяся, когда Исаак Ньютон открыл законы движения и тяготения, дала человечеству глубокое понимание физического мира, проверенное измерениями все более высокой точности. Из всех теорий и экспериментов выкристаллизовались два разных подхода к пониманию мира: частицы и волны.

Частица — это крохотная крупица вещества, точно определенная и локализованная. Волна похожа на рябь на воде, на движущееся возмущение; она более эфемерна, чем частица, и распространяется сквозь большую область пространства. Чтобы рассчитать орбиту движения планеты, планету можно представить частицей, потому что расстояния между планетами и звездами настолько чудовищны, что, если их уменьшить до размеров человека, планеты *станут* частицами. Звук — это возмущение воздуха, которое движется, хотя сам воздух остается практически в одном и том же месте; значит, звук — это волна. Частицы и волны — важные объекты классической физики, и они очень не похожи друг на друга.

В 1678 году началась серьезная полемика о природе света. Христиан Гюйгенс представил Парижской академии наук свою теорию о волновой природе света. Ньютон был убежден, что свет — это поток частиц, и его точка зрения тогда взяла верх. Но со временем, после ста лет блужданий в неверном направлении, были поставлены новые эксперименты, которые и выявили истину. Ньютон ошибался, а свет — это волна.

Около 1900 года физики открыли фотоэлектрический эффект: свет, попадающий на металл определенного типа, может вызвать небольшой электрический ток. Альберт Эйнштейн сделал вывод, что свет — это поток крошечных частиц — фотонов. Ньютон все же был прав. Но ведь от его теории отказались не без оснований: множество экспериментов очень ясно показали, что свет — это волна. Poleмика вспыхнула с новой силой. Так что же такое свет — волна или частица? В конце концов решили, что правильный ответ — «и то и другое». Иногда свет ведет себя как частица, а иногда как волна — зависит от эксперимента. Все это было непостижимо.

Однако нашлись первопроходцы, попытавшиеся осмыслить эту двойственность, — так родилась квантовая механика. Все классические данности, такие как положение частицы и скорость ее движения, оказались неприменимыми в микромире. Квантовый мир пронизан неопределенностью. Чем точнее вы измеряете положение частицы, тем меньше у вас уверенности в том, насколько быстро она движется. Хуже того, на вопрос «где она?» нет внятного ответа. Все, что вы можете сделать, — описать вероятность того, что она находится там-то и там-то. Квантовая частица — это уже и не частица вовсе, а размытое облако вероятностей.

Чем глубже физики погружались в квантовый мир, тем меньше определенности видели вокруг. Они могли описать это математически, но сама математика была причудливой. Прошли десятилетия, и физики осознали, что невозможно изгнать случайность из квантовых явлений. Квантовый мир действительно *соткан* из неопределенности, и дело не в недостатке информации — просто не существует более глубокого уровня описания. Стал популярным лозунг «Заткнись и считай»; и даже спрашивать неловко, в чем здесь смысл.

ФИЗИКА ОТПРАВИЛАСЬ ПО КВАНТОВОМУ ПУТИ, а математика тем временем прокладывала собственную дорогу. Мы привыкли думать, что противоположностью случайного процесса является детерминированный: если настоящее фиксировано, то возможно только одно-единственное будущее. Пятая эпоха неопределенности началась, когда математики и несколько физиков осознали, что детерминированная система может быть непредсказуемой. Такие системы изучает теория хаоса — так журналисты называли нелинейную динамику. Квантовая теория могла бы развиваться совсем иначе, если бы математики сделали это важнейшее открытие намного раньше. На самом деле один пример хаоса был обнаружен еще до появления квантовой теории, но к нему отнеслись только как к любопытному курьезу. Связная теория хаоса была построена лишь в 1960-х и 1970-х годах. Но чтобы рассказ мой был последовательным, я расскажу сначала о ней, а потом уж о квантовой теории.

«Предсказывать очень трудно, особенно трудно предсказывать будущее», — говорил физик Нильс Бор (или это был Йюги Берра? Видите, мы даже *это* не знаем наверняка [1]¹). Это не так смешно, как кажется на первый взгляд, потому что предсказание — совсем не то же, что прогнозирование. Большинство научных предсказаний говорят, что событие *произойдет* при определенных условиях, но не говорят, *когда именно*. Я могу предсказать, что землетрясение происходит из-за накопления напряжений в земной коре, и это можно проверить, измерив напряжения. Но таким методом нельзя спрогнозировать землетрясение, заблаговременно определив, *когда* оно произойдет. Можно даже «предсказать» событие в прошлом, подкрепив это предсказание ссылками на старые записи или находки. Я знаю, что этот прием иногда называют «послесказанием» или «постдикцией», но для проверки научной гипотезы он вполне годится. В 1980 году Луис и Уолтер Альваресы предсказали, что 65 миллионов лет назад на Землю упал метеорит и уничтожил динозавров. Это было настоящее предсказание: *после* того, как они его сде-

¹ В квадратных скобках здесь и далее даются ссылки на примечания автора в конце книги. — *Прим. ред.*

лали, они могли искать геологические данные и ископаемые останки в подтверждение или опровержение своей гипотезы.

Десятилетия наблюдений показывают, что размеры клюва у некоторых видов вьюрков Дарвина на Галапагосских островах полностью предсказуемы — при условии, что вы можете предсказать среднегодовое количество осадков. Размеры клюва меняются в зависимости от того, насколько влажным или сухим был год. В засушливые годы семена тверже, поэтому нужны большие клювы. А если год влажный, то удобнее клювы поменьше. Размер клюва предсказуем условно. Если бы надежный оракул сообщил нам, какими будут в следующем году осадки, мы могли бы смело предсказать размеры клюва. Это совсем не то же самое, когда размеры клюва меняются случайно. Если бы они были случайными, то не зависели бы от осадков.

Бывает и так, что одни функции системы предсказуемы, а другие нет. Мой любимый пример — из астрономии. В 2004 году астрономы объявили, что астероид под названием 99 942 Апофис может столкнуться с Землей 13 апреля 2029 года, или, если этого не произойдет, то 13 апреля 2036 года может появиться вторая возможность. Один журналист (правду сказать, в юмористической колонке) спросил: почему астрономы так уверены в дате, если они даже год не знают наверняка?

Оторвитесь от книги и подумайте над этим вопросом. Подсказка: что такое год?

Все просто. Столкновение может произойти только когда орбита астероида или пересекает орбиту Земли, или проходит очень близко к ней. Орбиты этих небесных тел несколько меняются с течением времени, влияя на то, насколько близко они подходят друг к другу. Если у нас недостаточно наблюдений, чтобы определить орбиту астероида с нужной точностью, мы не знаем, насколько близко он подойдет к Земле. У астрономов было достаточно данных, чтобы исключить большинство лет в ближайшем будущем, но только не годы 2029 и 2036. А вот дата возможного столкновения ведет себя совершенно иначе. Земля возвращается (почти) в одно и то же место своей орбиты каждый год. Собственно, так мы и определяем «год». В частности, приближение на-

шей планеты к месту пересечения с орбитой астероида происходит с интервалом в год, то есть в один и тот же день ежегодно. (Может быть, на день раньше или позже, если время приближается к полуночи.) Как оказалось, для Апофиса этот день — 13 апреля.

Так что Бор или Берра был абсолютно прав, и слова его действительно глубоки. Даже когда мы в деталях понимаем, как все работает, мы можем не знать, что произойдет на следующей неделе, в следующем году или в следующем столетии.

СЕЙЧАС МЫ ВСТУПИЛИ в шестую эпоху неопределенности. Для нее характерно осознание, что неопределенность проявляется в разных формах, каждая из которых в той или иной мере постижима. У нас есть большой набор математических инструментов, чтобы принимать правильные решения в мире, который все еще ужасно неопределен. Мощные современные компьютеры позволяют быстро и точно анализировать огромные объемы данных. «Большие данные» сейчас у всех на слуху, хотя пока мы лучше собираем их, чем извлекаем из них пользу. Наши теоретические модели подкрепляются вычислениями. За секунду мы можем выполнить больше вычислений, чем все математики в истории, обходившиеся ручкой и бумагой. Наше математическое понимание различных форм неопределенности мы вооружаем сложными алгоритмами, чтобы выявить закономерности и структуры или просто оценить меру неопределенности, — и это позволяет нам хотя бы отчасти приручить наш неопределенный мир.

Мы гораздо лучше предсказываем будущее, чем раньше. Нам все еще случается попадать под дождь, когда прогноз погоды обещает сухую погоду; но точность прогноза погоды значительно улучшилась с 1922 года, когда метеоролог Льюис Фрай Ричардсон писал свою работу «Прогноз погоды численными методами». Прогноз не просто стал лучше: к нему прилагается оценка вероятности того, что он верен. Когда сайт с прогнозом погоды сообщает о 25%-й вероятности дождя, это означает, что в 25% случаев, когда было сделано такое же заявление, дождь действительно проливался.

[. . .]