



СКОТТ ПЕЙДЖ

МОДЕЛЬНОЕ МЫШЛЕНИЕ

как анализировать сложные
явления с помощью
математических моделей

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

ОГЛАВЛЕНИЕ

Пролог	13
<i>ГЛАВА 1</i> Многомодельное мышление	17
<i>ГЛАВА 2</i> Зачем нужны модели?	34
<i>ГЛАВА 3</i> Наука о множестве моделей	51
<i>ГЛАВА 4</i> Моделирование поведения людей	72
<i>ГЛАВА 5</i> Нормальное распределение: колоколообразная кривая	94
<i>ГЛАВА 6</i> Степенное распределение: длинный хвост	107
<i>ГЛАВА 7</i> Линейные модели	125
<i>ГЛАВА 8</i> Вогнутость и выпуклость	140
<i>ГЛАВА 9</i> Модели ценности и влияния	156
<i>ГЛАВА 10</i> Сетевые модели	168
<i>ГЛАВА 11</i> Трансляция, диффузия и заражение	186
<i>ГЛАВА 12</i> Энтропия: моделирование неопределенности	202
<i>ГЛАВА 13</i> Случайные блуждания	213
<i>ГЛАВА 14</i> Зависимость от первоначально выбранного пути	227
<i>ГЛАВА 15</i> Модели локальных взаимодействий	238
<i>ГЛАВА 16</i> Функции Ляпунова и равновесие	249
<i>ГЛАВА 17</i> Модели Маркова	260

[>>> Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

ГЛАВА 18	Модели системной динамики	275
ГЛАВА 19	Пороговые модели с обратной связью	290
ГЛАВА 20	Пространственные и гедонические модели выбора	307
ГЛАВА 21	Три класса моделей теории игр	327
ГЛАВА 22	Модели кооперации	338
ГЛАВА 23	Проблемы коллективных действий	359
ГЛАВА 24	Дизайн механизмов	375
ГЛАВА 25	Модели сигнализирования	394
ГЛАВА 26	Модели обучения	405
ГЛАВА 27	Задачи о многоруком бандите	423
ГЛАВА 28	Модели пересеченного ландшафта	433
ГЛАВА 29	Опиоиды, неравенство и смирение	447
	Примечания	469
	Библиография	504
	Предметно-именной указатель	520

Посвящается Майклу Коэну (1945–2013)

*Едва ли можно отрицать, что высшая цель
любой теории — сделать неприводимые
базовые элементы как можно проще
и немногочисленнее, не отказываясь
от адекватного представления исходной
единицы опыта.*

Альберт Эйнштейн

ПРОЛОГ

*Для меня успех означает эффективность
в окружающем мире, способность
привнести в него свои идеи и ценности
и изменить его к лучшему.*

Максин Хонг Кингстон

Все началось со случайной встречи с Майклом Коэном в 2005 году возле цветника на аллее, примыкающей к зданию West Hall Мичиганского университета. Тогда Майкл — ученый, известный своим великодушием, — подобрал мне идею, которая изменила мою преподавательскую карьеру. С блеском в глазах он сказал: «Скотти, когда-то я читал курс под названием “Введение в моделирование для специалистов в области общественных наук”, основанный на книге Чарльза Лейва и Джеймса Марча. Ты должен возродить его. Он нуждается в тебе».

Нуждается во мне? Вернувшись в свой кабинет в некотором замешательстве, я отыскал программу старого курса. Как оказалось, Майкл ввел меня в заблуждение. Не курс нуждался во мне, а наоборот, я в нем. Я давно хотел разработать курс, который бы позволил студентам ознакомиться с основными концепциями сложных систем (такими как сети, разнообразие, машинное обучение, редкие события, зависимость от предшествующего развития, переломные моменты), что напрямую касалось их повседневной жизни и будущей карьеры. Преподавая моделирование, я мог бы рассказать им о концепции сложности и научить эффективно мыслить. Я помог бы им освоить инструменты, улучшающие способность рассуждать, объяснять, прогнозировать, проектировать, общаться, действовать и исследовать.

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

Источником мотивации во время обучения могла бы стать уверенность в том, что множество моделей помогут разобраться во всех перипетиях современного мира. В конце семестра, вместо того чтобы видеть мир под определенным углом, студенты обрели бы способность рассматривать его с разных сторон. Находясь в доме с огромным количеством окон, они могли бы смотреть в нескольких направлениях и были бы лучше подготовлены к комплексу стоящих перед ними сложных задач, таких как совершенствование системы образования, снижение уровня бедности, обеспечение устойчивого роста, поиск значимой работы в эпоху искусственного интеллекта, управление ресурсами и разработка надежных финансовых, экономических и политических систем.

Осенью следующего года я возродил курс. Сначала я хотел дать ему новое название «Тридцать две модели, которые превратят вас в гения», но, учитывая, что культура Мичиганского университета не одобряет использования гипербол, оставил вариант Майкла «Введение в моделирование». Безусловно, книга Лейва и Марча была блестящим фундаментом. Однако ввиду того, что за последующие десятилетия в области моделирования был достигнут существенный прогресс, мне требовалась обновленная версия курса, включающая распределение с длинным хвостом*, сети, адаптивный ландшафт и случайные блуждания. Мне также нужна была книга, рассматривавшая вопросы сложности.

И я начал ее писать. На протяжении двух лет почва была очень каменистой, и мой плуг двигался медленно. Однажды весной я снова столкнулся с Майклом, на этот раз в арке West Hall, и начал расспрашивать его о курсе, на который записалось уже двадцать человек. Не слишком ли абстрактны модели для студентов базового университетского курса? Следует ли мне преподавать отдельные курсы по конкретным проблемам или областям политики? Майкл улыбнулся и сказал, что любое стоящее начинание заслуживает критической оценки, и на прощание подчеркнул, насколько важно помогать людям учиться четко мыслить. Он советовал не сдаваться и отметил, что его вдохновляют стоящие передо мной вызовы.

Осенью 2012 года ситуация улучшилась. Заместитель проректора Марта Поллак предложила мне вести онлайн-версию курса — то, что сейчас называют МООС (massive open online course — массовый открытый онлайн-курс). Так с помощью планшета, камеры за 29 долларов и микрофона за 90 долларов

* О распределениях с длинными хвостами см. главу 6. *Прим. ред.*

и появился курс «Модельное мышление». При содействии сотрудников Мичиганского университета, проекта Coursera и Стэнфордского университета (которых слишком много, чтобы я мог должным образом их всех поблагодарить; упомяну только Тома Хикки, проделавшего колоссальную работу) я перевел свои лекции в формат, подходящий для онлайн-курса, разделив каждую тему на модули и удалив все материалы, защищенные авторским правом. Со своим псом по кличке Баундер в качестве слушателя я упорно записывал и переписывал лекции.

Первый курс лекций «Модельное мышление» привлек 60 000 студентов. Сегодня их количество приближается к миллиону. Такая популярность онлайн-курса заставила меня прекратить работу над книгой, поскольку я решил, что теперь она не нужна. Однако в течение следующих двух лет мой почтовый электронный ящик заполнили письма с просьбой дополнить онлайн-курс книгой. А когда Майкл Коэн проиграл битву с раком, я почувствовал, что просто обязан закончить книгу, и снова открыл папку с рукописью.

Написание книги требует много времени и пространства, чтобы ясно мыслить. Поэт Уоллес Стивенс писал: «Возможно, правда зависит от прогулки вокруг озера». Я полагался на близкий аналог там, где моя семья проводит лето, — на проясняющие разум заплывы в озере Уинанс. Время работы над книгой скрашивали члены моей семьи — любовь всей моей жизни Дженна Беднар, наши сыновья Орри и Купер и наши огромные собаки Баундер, Ода и Хильди. Оно было наполнено смехом, умиротворением и возможностями — в частности, Орри на протяжении недели исправлял математические ошибки в предпоследнем черновике, а Дженна посвятила две недели поиску в тексте угловатых конструкций, логических ошибок и сбивчивых рассуждений. Как и большинство моих работ, эту правильнее всего представить как черновик Скотта Пейджа, существенно переработанный Дженной Беднар.

За те семь лет, что я писал эту книгу, мои дети из подростков превратились в прекрасных молодых юношей. Орри уехал учиться в колледж, а Купер отправится туда в следующем году. За это время члены моей семьи поглотили изрядное количество бибимбапа, пасты карбонара и шоколадного овсяного печенья, срезали и срубили множество веток и сучьев, залатали десятки дыр в заборе на заднем дворе, предприняли множество безуспешных попыток уменьшить энтропию в подвале и гараже, а также с нетерпением каждый раз ждали и надеялись, что лед на озере будет достаточно крепким для катания на коньках. Нам также довелось пережить потерю. Когда я проделал примерно

половину работы над книгой, от сердечного приступа внезапно умерла моя мама Мэрилин Тамбуэр Пейдж. Это произошло во время одной из ежедневных прогулок с собакой, которые она обожала. С тех пор не проходит и дня, чтобы я не вспоминал о той любви, которой мама одаривала семью, и о ее неиссякаемом желании помогать людям.

Книга, которую вы держите в руках, настолько исчерпывающая, насколько это возможно в данный момент. Безусловно, будут созданы новые модели, а для старых появятся новые области применения, из-за чего возникнут определенные пробелы в представленном материале. Смирненно отправляя рукопись в большой мир, я чувствую, что мои усилия будут вознаграждены, если вы, читатель, сочтете содержащиеся в ней модели и идеи полезными и продуктивными и сможете применить их в реальном мире, чтобы изменить его к лучшему.

Если однажды, сидя в кабинете какого-либо профессора или аспиранта (желательно в одном из колледжей или университетов моего любимого Среднего Запада), я, просматривая книжные полки, увижу там эту книгу, как в свое время увидел потрепанный экземпляр книги Лейва и Марча, значит, мои усилия не пропали зря.

ГЛАВА 1

МНОГОМОДЕЛЬНОЕ МЫШЛЕНИЕ

*Мудрость — это умение организовать
свой опыт (как опосредованный,
так и непосредственный) и знания
на матрице различных моделей.*

Чарльз Мангер

Это книга о моделях. В ней просто и понятно описываются десятки моделей и способы их применения. Модели — это формальные структуры, представленные в виде математических формул и диаграмм, которые помогают нам понять этот мир. Их освоение улучшает способность рассуждать, объяснять, разрабатывать, коммуницировать, действовать, прогнозировать и исследовать.

В книге рассматривается подход под названием *многомодельное мышление*: использование совокупности моделей для осмысления сложных явлений. Основная идея состоит в том, что многомодельное мышление порождает мудрость посредством применения разнообразного ансамбля логических структур. Различные модели акцентируются на отдельных причинно-следственных факторах. В итоге их выводы и следствия перекрываются и переплетаются. Используя множество моделей в качестве логических структур, мы добиваемся детального, глубокого понимания происходящего. В книгу включены формальные аргументы, убедительно обосновывающие концепцию множества моделей, а также многочисленные примеры из реальной жизни.

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

Книга имеет прагматическую направленность, а многомодельное мышление — огромную практическую ценность. Практикуя его, вы сможете лучше понять сложные явления. Научитесь эффективнее выстраивать логические умозаключения. В ваших рассуждениях будет меньше пробелов и вы станете принимать более взвешенные решения в отношении карьеры, общественной деятельности и личной жизни. А возможно, даже обретете мудрость.

Двадцать пять лет назад книга о моделях заинтересовала бы преподавателей и аспирантов, изучающих бизнес, политику и общественные науки, а также финансовых аналитиков, страховых агентов и сотрудников спецслужб. Именно они применяли модели на практике и чаще всего имели дело с большими массивами данных. Сегодня аудитория книги о моделях существенно расширилась — это огромное количество работников умственного труда, которые в связи с появлением больших данных теперь считают работу с моделями частью повседневной жизни.

Организация и интерпретация данных с помощью моделей стала ключевым умением специалистов по бизнес-стратегиям, градостроителей, экономистов, медиков, инженеров, страховых аналитиков и ученых-экологов. Каждый, кто анализирует данные, формирует бизнес-стратегии, распределяет ресурсы, разрабатывает продукты и протоколы или принимает решения о найме, сталкивается с моделями. Следовательно, усвоение материала данной книги (особенно моделей, охватывающих такие области, как инновации, прогнозирование, биннинг данных*, обучение и расчет времени выхода на рынок) будет иметь для многих практическую ценность.

Многомодельное мышление не просто повысит вашу эффективность на работе, но и сделает вас более достойными гражданами и более вдумчивыми участниками общественной жизни. Благодаря ему вы станете настоящими экспертами в оценке экономических и политических событий. Научитесь обнаруживать изъяны в своей логике и логике других. Сможете определять, когда идеология вытесняет здравый смысл, и выработаете более глубокое, многоуровневое понимание последствий политических инициатив, будь то в отношении зеленых зон или обязательных тестов на наркотики.

* Процесс обработки данных, который преобразует непрерывные данные в дискретные путем замены значений диапазонами. *Прим. ред.*

Все эти преимущества будут получены в результате использования множества различных моделей — не сотен, а нескольких десятков. Модели, о которых пойдет речь в книге, — хороший базовый набор. Они проистекают из разных дисциплин и включают дилемму заключенного, гонку по нисходящей и модель распространения инфекционных заболеваний SIR. Все эти модели имеют общую форму: они предполагают наличие множества объектов (чаще всего это люди или организации) и описывают взаимодействие между ними.

Представленные в книге модели можно разделить на три категории: упрощенные модели мира, математические аналогии и исследовательские, искусственные конструкции. Какой бы ни была форма, модель должна быть разрешимой, то есть достаточно простой, чтобы в ней можно было применять логику. Например, в книгу включена модель распространения инфекционных заболеваний, позволяющая на основе данных о трех группах людей — инфицированных, восприимчивых к болезни и излечившихся от нее — определять степень распространения болезни, а также вычислять пороговый уровень заражения (переломный момент, после которого болезнь начинает распространяться) и количество людей, которых необходимо вакцинировать, чтобы остановить распространение заболевания.

Однако какими бы действенными ни были отдельные модели, их комбинация позволяет добиться большего, поскольку исключает свойственную им ограниченность. Многомодельный подход проливает свет на белые пятна каждой модели, входящей в комбинацию. Политические решения, принятые на основе одиночных моделей, могут не учитывать важных особенностей окружающего мира, таких как неравенство в распределении доходов, многообразие идентичности и взаимосвязи с другими системами [1]. Использование набора моделей помогает выстраивать логическую интерпретацию множества процессов. Мы видим, как они перекрываются и взаимодействуют, создаем почву для осмысления той сложности, которая присуща нашей экономической, политической и социальной жизни. И делаем это, не поступаясь строгостью, — модельное мышление гарантирует логическую связность. Далее эту логику можно подкрепить фактическими данными, применив к ним модели для проверки, уточнения и совершенствования. В общем, когда наше мышление опирается на последовательную, эмпирически подтвержденную систему координат, это повышает вероятность принятия мудрых решений.

МОДЕЛИ В ЭПОХУ ДАННЫХ

20

Появление книги о моделях может показаться неуместным в эпоху больших данных, которые сегодня характеризуются беспрецедентной размерностью и степенью детализации. Данные о покупках клиентов, раньше поступавшие в виде ежемесячных совокупных показателей, распечатанных на бумаге, теперь представляют непрерывный поток геопространственных, временных и потребительских тегов. Данные об академической успеваемости студентов теперь включают баллы за каждое домашнее задание, работу, тест и экзамен, в отличие от итоговых оценок в конце семестра. В прошлом фермер мог упомянуть о засушливой почве на ежемесячном собрании ассоциации фермеров. Теперь тракторы передают мгновенные данные о состоянии почвы и уровне влажности в расчете на каждый квадратный метр. Инвестиционные компании отслеживают десятки показателей и тенденций по тысячам акций и используют инструменты обработки текстов на естественных языках для синтаксического анализа документов. Врачи могут страница за страницей получать данные из истории болезни пациентов, в том числе важные генетические маркеры.

Всего каких-то двадцать пять лет назад большинство из нас имели доступ к знаниям, размещавшимся на нескольких книжных полках. Возможно, у вас на работе была небольшая библиотека справочной литературы или коллекция энциклопедий и несколько десятков справочников дома. Хотя ученые и исследователи из правительственного и частного сектора имели доступ к большим библиотечным фондам, им все равно приходилось физически их посещать, чтобы получить необходимые материалы. Даже на рубеже нового тысячелетия еще можно было увидеть, как ученые курсируют туда-сюда между библиотечными картотеками, коллекциями микрофильмов, книжными стеллажами и специальными хранилищами в поисках информации.

Сегодня все по-другому. Контент, веками отображаемый исключительно на бумаге, теперь передается крохотными блоками по воздуху, так же как и информация о событиях, происходящих здесь и сейчас. Новости, приходившие к нам один раз в день в виде газеты, теперь поступают в виде непрерывного цифрового потока на наши персональные устройства. При помощи нескольких движений пальцев или мышки можно узнать курс акций и результаты спортивных соревнований, а также новости о политических и культурных событиях.

[Купить книгу на сайте kniga.biz.ua >>>](http://kniga.biz.ua)

Но какими бы впечатляющими ни были данные, это не панацея. Да, теперь мы знаем, что уже произошло или происходит в настоящий момент, но из-за сложности современного мира не всегда способны понять, почему. Выводы, полученные эмпирическим путем, могут вводить в заблуждение. Данные о сдельной оплате труда часто показывают, что чем больше людям платят за единицу продукции, тем меньше они производят. Модель, в которой оплата зависит от условий труда, может объяснить этот парадокс. Если условия плохие и затрудняют выпуск продукции, оплата за единицу продукции может быть высокой. Если условия хорошие, оплата может быть низкой. Таким образом, более высокая оплата не приводит к снижению производительности, скорее наоборот, тяжелые условия труда требуют более высокой оплаты за единицу продукции [2].

Кроме того, большая часть социальных данных (об экономических, социальных и политических явлениях) отражает только отдельные моменты или промежутки времени и редко раскрывает универсальные истины. Наш экономический, социальный и политический мир не статичен. Например, мальчики могут превзойти девочек по стандартизованным тестам в одно десятилетие, а девочки — в следующее. Причины, по которым люди голосуют сегодня, могут отличаться от причин, по которым они проголосуют завтра.

Нам нужны модели, чтобы осмыслить потоки данных, изливающих на наши компьютерные экраны как из пожарного шланга. Именно из-за их беспрецедентного объема современную эпоху можно также назвать эпохой множества моделей. Взгляните на научный и деловой мир, сферу государственного управления и некоммерческий сектор — вряд ли вы найдете там область исследований или принятия решений, не основанную на использовании моделей. Консалтинговые гиганты McKinsey и Deloitte создают модели для разработки бизнес-стратегий. Такие финансовые компании, как BlackRock и JPMorgan Chase, используют модели для выбора объектов для инвестиций. Актуарии страховых компаний State Farm и Allstate применяют модели для определения риска при расчете цены страховых полисов. Отдел персонала компании Google разрабатывает аналитические модели прогнозирования для оценки более чем трех миллионов кандидатов на вакантные должности. Приемные комиссии колледжей и университетов создают прогностические модели для отбора студентов из десятков тысяч абитуриентов.

Административно-бюджетное управление разрабатывает экономические модели для прогнозирования последствий налоговой политики. Компания

Warner Brothers использует анализ данных для создания моделей отклика аудитории. Amazon разрабатывает модели машинного обучения для предоставления рекомендаций по продуктам. Исследователи, финансируемые Национальными институтами здравоохранения, строят математические модели генома человека для поиска и оценки вероятных методов лечения онкологических заболеваний. Фонд Билла и Мелинды Гейтс применяет эпидемиологические модели для разработки стратегий вакцинации. Даже спортивные команды применяют модели для оценки своих потенциальных членов, возможностей для обмена и формирования стратегий игры. Опираясь на модели при отборе игроков и стратегий, бейсбольный клуб Chicago Cubs сумел выиграть чемпионат США по бейсболу после более чем столетия неудач.

Для людей, использующих модели, объяснение популяризации модельного мышления звучит еще проще: *модели делают нас умнее*. Без них люди страдают от длинного списка когнитивных искажений: придают чрезмерное значение недавним событиям, присваивают значения вероятности, руководствуясь благоразумием, и игнорируют базовые процентные ставки. Без моделей наша способность учитывать данные ограничена. Применение моделей вносит ясность в исходные предположения и позволяет логически мыслить. Кроме того, благодаря моделям мы можем использовать большие данные для подбора, точной формулировки и проверки каузальных и коррелятивных утверждений. Модели помогают нам эффективнее мыслить. В прямом состязании между моделями и людьми побеждают модели [3].

ПОЧЕМУ НАМ НУЖНО МНОГО МОДЕЛЕЙ

В книге подчеркивается важность применения не одной, а множества моделей к каждой конкретной ситуации. Логическое обоснование многомодельного подхода строится на прошедшей проверке временем идее, что мы обретаем мудрость благодаря всестороннему анализу происходящего. Эта идея восходит к Аристотелю, который писал о ценности объединения достоинств многих людей. Разнообразие точек зрения стало также мотиватором движения за популяризацию великих книг, в ходе которого были отобраны 102 лучшие идеи, вошедшие в двухтомник *The Great Ideas: A Syntopicon of Great Books of the Western World* («Великие идеи: синтопикон великих книг западного мира»). Современная трактовка этого подхода представлена в работе Максин

Хонг Кингстон, которая в своей книге *The Woman Warrior* («Воительница») пишет: «Ввиду величия Вселенной я научилась увеличивать свой разум, с тем чтобы было место как для Вселенной, так и для парадоксов». Кроме того, этот подход также служит основой прагматических действий в мире бизнеса и политики. В опубликованных в последнее время книгах утверждается, что, если мы хотим понять суть международных отношений, мы не должны моделировать мир исключительно как группу движимых собственными интересами стран, преследующих четко обозначенные цели, или только как развивающуюся взаимосвязанную систему транснациональных корпораций и межправительственных организаций. Мы должны делать и то и другое [4].

Каким бы здравым ни казался многомодельный подход, не стоит забывать, что он противоречит стандартным методам обучения моделям и практике их построения. Традиционный подход (который преподают в средней школе) опирается на взаимно-однозначную логику: одна задача требует одной модели. Например: здесь мы применяем первый закон Ньютона, тут — второй, а здесь третий. Или: здесь мы используем уравнение репликативной динамики для определения размера популяции кроликов в следующем периоде. При применении традиционного подхода задача заключается в том, чтобы, во-первых, найти одну подходящую модель и, во-вторых, правильно ее применить. Многомодельное мышление бросает вызов этому подходу и исповедует принцип применения множества моделей. Если бы вы использовали многомодельное мышление в девятом классе, вас бы, возможно, оставили на второй год. Используя его сейчас, вы будете двигаться вперед.

Авторы научных трудов также в основном придерживаются взаимно-однозначного подхода, даже когда применяют отдельные модели для простого объяснения сложных явлений: избирателями Трампа 2016 года были люди, которые оказались на обочине экономической жизни. Или: квалификация учителя ребенка-второклассника определяет его экономический успех во взрослой жизни [5]. Поток бестселлеров в категории научно-популярной литературы предлагает средства от всех наших бед, основанные на одномодельном мышлении: успех обучения зависит от твердости характера. Неравенство обусловлено концентрацией капитала. Слабое здоровье нации — результат потребления сахара. Каждая из этих моделей может быть верной, но ни одна не является всеобъемлющей. Для того чтобы справиться с высоким уровнем сложности подобных проблем и создать мир более широких достижений в области образования, понадобятся матрицы моделей.

Изучив представленные в книге модели, вы сможете выстроить собственную матрицу. Эти модели берут свое начало в широком диапазоне дисциплин и затрагивают самые разные проблемы, такие как причины неравенства доходов, распределение власти, распространение заболеваний и модных увлечений, предпосылки социальных волнений, эволюция кооперации, формирование порядка в больших городах и структура интернета. Модели, рассматриваемые в книге, разнятся по своим исходным предположениям и структуре. Одни описывают небольшое количество рационально мыслящих индивидуумов, движимых личными интересами. Другие — большие группы альтруистов, соблюдающих правила. Третьи — равновесные процессы. Четвертые объясняют сложность и зависимость от первоначально выбранного пути. Все они также различаются областями применения. Одни позволяют прогнозировать и объяснять. Другие служат руководством к действию, помогают в процессе разработки или облегчают коммуникации. Третьи создают искусственные миры, которые исследует наш разум.

Все эти модели имеют три общие характеристики. Во-первых, они упрощают, устраняя несущественные детали, абстрагируясь от реальности или создавая нечто совершенно новое. Во-вторых, обеспечивают формализацию, давая точные определения. Используют математику, а не слова. Могут представлять убеждения в виде распределения вероятностей по состояниям мира или предпочтения в виде упорядоченного списка альтернатив. Создают путем упрощения и точного определения пространство, в котором можно применять логику, выдвигать гипотезы, разрабатывать решения и подбирать данные. Формируют структуры, в рамках которых мы можем логически мыслить. Как писал Людвиг Витгенштейн в своем труде *Tractatus Logico-Philosophicus* («Логико-философский трактат»), «логика заботится о себе сама, нам нужно лишь следить за тем, как она это делает». Логика помогает объяснять, прогнозировать, коммуницировать и разрабатывать. Тем не менее логика имеет свою цену, что ведет к третьей характеристике моделей: *все модели неправильны*, как отметил Джордж Бокс [6]. И это действительно верно в отношении *всех* моделей: даже грандиозные творения Ньютона, которые мы называем законами, действуют только в определенных масштабах. Модели неправильны, потому что упрощают действительность. Опускают детали. Рассмотрение множества моделей позволяет преодолеть ограничение научной строгости путем охвата всего пространства возможного.

Полагаться на одну модель — это высокомерие, чреватое катастрофой. Верить в то, что одно уравнение может объяснить или спрогнозировать сложные явления реального мира, — значит стать жертвой притягательной силы чистых, строгих математических форм. Не стоит рассчитывать на то, что какая-либо одна модель позволит составить точный численный прогноз уровня моря через 10 000 лет или уровня безработицы через 10 месяцев. Для осмысления сложных систем понадобится множество моделей. Такие сложные системы, как политика, экономика, международные отношения или мозг, демонстрируют непрерывно меняющиеся системные эффекты и закономерности, которые заключены между порядком и хаосом. Сложные явления по определению трудно объяснять, развивать или прогнозировать [7].

В результате мы наблюдаем явное несоответствие. С одной стороны, нам нужны модели, чтобы последовательно мыслить, а с другой — любая отдельная модель с несколькими меняющимися элементами не способна объяснить суть сложных многомерных явлений, таких как закономерности в международной торговой политике, тенденции в отрасли потребительских товаров или адаптивная реакция мозга. Никакой Ньютон не сможет написать уравнение с тремя переменными, объясняющее ежемесячные показатели занятости, результаты выборов или снижение уровня преступности. Если мы хотим понять закономерности распространения болезней, изменчивость показателей успеваемости, разнообразие флоры и фауны, воздействие искусственного интеллекта на рынки труда, влияние людей на климат планеты или вероятность социальных волнений, нам следует все это проанализировать с помощью моделей машинного обучения, моделей динамических систем, моделей теории игр и агентных моделей.

ИЕРАРХИЯ МУДРОСТИ

Чтобы изложить в общих чертах аргументы в пользу многомодельного мышления, начнем с цитаты поэта и драматурга Томаса Стернза Элиота: «Где мудрость, утраченная нами ради знания? Где знание, утраченное нами ради сведений?». Мы могли бы к этому добавить: где информация, утраченная нами ради данных?

Вопросы Элиота можно формально описать как *иерархию мудрости*. На ее нижнем уровне находятся *данные*: первичные, незакодированные

события, переживания и явления, такие как рождение, смерть, рыночные сделки, голосование, загрузка музыки, осадки, футбольные матчи и эпизоды видообразования. Данные могут представлять собой длинные цепочки нулей и единиц, временных меток и связей между страницами. В данных нет смысла, упорядоченности или структуры.

Информация описывает данные и делит их на категории. Следующие примеры объясняют различие между данными и информацией. Дождь, падающий вам на голову, — это данные. Общее количество осадков за июль в Берлингтоне, а также уровень воды в озере Онтарио — это информация. Ярко-красный перец и желтая кукуруза в фермерских палатках, расположенных вокруг здания законодательного собрания в Мэдисоне во время субботней ярмарки, — это данные. Совокупный объем реализации продукции фермерских хозяйств — это информация.

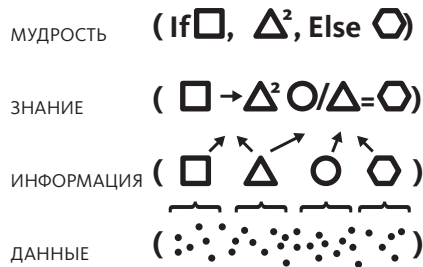


Рис. 1.1. Как модели преобразуют данные в мудрость

Мы живем в эпоху изобилия информации. Полтора столетия назад обеспечение информацией обеспечивало высокий экономический и социальный статус. Эмма, героиня одноименного романа Джейн Остин, спрашивает, производит ли Фрэнк Черчилл впечатление информированного молодого человека. Сегодня она не стала бы задавать этот вопрос. У Черчилля, как и у всех нас, был бы смартфон. Вопрос в том, как бы он воспользовался имеющейся информацией. В романе «Преступление и наказание» Федор Достоевский пишет: «У нас есть, дескать, факты! Да ведь факты не все; по крайней мере половина дела в том, как с фактами обращаться умеешь!»

Платон определял *знание* как обоснованное истинное убеждение. В современных определениях оно трактуется как понимание корреляционных, причинных и логических связей. Знание организует информацию и часто принимает форму модели. Экономические модели рыночной конкуренции,

социологические модели сетей, геологические модели землетрясений, экологические модели формирования ниш и психологические модели познания — все включают в себе знание, объясняют и прогнозируют. Модели химических связей объясняют, почему связи в молекулах металла мешают нам просунуть руку сквозь металлическую дверь, тогда как движение молекул воды уменьшает наш вес, когда мы ныряем в озеро [8].

На вершине иерархии находится *мудрость* — способность выявлять и применять соответствующие знания. Мудрость требует многомодельного мышления. Иногда она сводится к выбору лучшей модели, как при извлечении стрелы из колчана. А иногда достигается за счет усреднения моделей, что часто происходит при составлении прогнозов. (Мы обсудим важность усреднения моделей в следующем разделе.) Перед тем как предпринять те или иные действия, мудрые люди применяют несколько моделей, так же как врачи совокупность диагностических тестов. Это позволяет исключить одни действия и отдать предпочтение другим. Мудрые люди и команды выстраивают диалог между моделями, анализируя области их пересечения и различия.

Мудрость может состоять в выборе правильных знаний или модели. Рассмотрим такую физическую задачу: маленькая мягкая игрушка гепарда падает с самолета, летящего на высоте 6000 метров. Чем чревато ее падение на землю? Студент может знать модель гравитации и модель предельной скорости падения. Эти модели рассматривают происходящее под разными углами. Гравитационная модель прогнозирует, что мягкая игрушка пробьет крышу автомобиля. Но модель предельной скорости с учетом сопротивления воздуха говорит о том, что скорость игрушечного гепарда приблизится примерно к 16 километрам в час [9]. Мудрость состоит в знании о том, что следует применить модель предельной скорости. Стоящий на земле человек может поймать мягкую игрушку руками. Как сказал по этому поводу эволюционный биолог Джон Бердон Сандерсон Холдейн, «можно уронить мышь в угольную шахту глубиной в тысячу ярдов; достигнув дна, мышь, отделившись легким сотрясением, убежит, если только земля будет достаточно мягкой. Крыса погибнет, человек разобьется, а лошадь превратится в лепешку».

В задаче с мягкой игрушкой для получения правильного решения требуется информация (вес игрушки), знания (модель предельной скорости) и мудрость (выбор правильной модели). Бизнес-лидеры и политики тоже полагаются на информацию и знания в ходе принятия мудрых решений. Девятого октября 2008 года стоимость денежной единицы Исландии (кроны) начала

стремительно падать. Эрику Боллу, в то время финансовому директору компании Oracle (гиганта в области разработки программного обеспечения), предстояло принять решение. За несколько недель до этого он уже столкнулся с внутренними последствиями кризиса ипотечного кредитования. Ситуация в Исландии вызывала озабоченность на международном уровне. Oracle держала миллиарды долларов в зарубежных активах. Болл проанализировал сетевые модели распространения финансового кризиса и рассмотрел экономические модели спроса и предложения, указывающие на наличие корреляции между величиной изменения цен и степенью рыночных потрясений. В 2008 году ВВП Исландии составлял 12 миллиардов долларов, что эквивалентно доходу корпорации McDonald's менее чем за полгода. Болл вспоминает, что тогда подумал: «Исландия меньше Фресно. Возвращайся к работе» [10]. Ключ к пониманию этого события и многомодельному мышлению в целом заключается в осознании того факта, что Болл проанализировал множество моделей не для того, чтобы найти среди них одну в поддержку своих действий. И не использовал принцип многомодельного мышления ради их обоснования. Напротив, он оценил две модели как потенциально полезные, а затем выбрал более подходящую. У Болла была правильная информация (Исландия — маленькая страна), он выбрал правильную модель (спрос и предложение) и принял мудрое решение.

Далее мы покажем, как обеспечить диалог между различными моделями посредством переосмысления двух исторических событий: краха мирового финансового рынка 2008 года, приведшего к сокращению совокупного богатства (или того, что считалось таковым) на триллионы долларов и последующей четырехлетней глобальной рецессии, а также Карибского кризиса 1961 года, который едва не перерос в ядерную войну.

Финансовый кризис 2008 года объясняется разными причинами: избыток иностранных инвестиций, чрезмерная задолженность инвестиционных банков, отсутствие надзора за ипотечным кредитованием, блаженный оптимизм всех представителей рынка недвижимости, сложность финансовых инструментов, непонимание рисков и алчность банкиров, которые знали о существовании пузыря, но рассчитывали на спасение. Поверхностные доказательства совпадают с каждым из этих объяснений: поток денег поступал из Китая, инициаторы займов предоставляли проблемные ипотечные кредиты, у инвестиционных банков был высокий коэффициент заемного капитала, финансовые инструменты были слишком сложными для понимания большинства, а некоторые банки действительно рассчитывали на финансовую помощь.

Модели позволяют проанализировать эти объяснения и их внутреннюю согласованность: имеют ли они логический смысл? Кроме того, мы можем откалибровать их и проверить величину воздействия.

Экономист Эндрю Ло, практикующий многомодельное мышление, проанализировал двадцать одно объяснение причин кризиса и нашел каждое из них недостаточно убедительным. Нет никакой логики в том, что инвесторы будут способствовать образованию пузыря, зная, что это приведет к глобальному кризису. Следовательно, масштаб пузыря должен был стать для многих неожиданностью. Финансовые компании вполне могли предположить, что другие компании проявили должную осмотрительность, тогда как на самом деле этого не было. Кроме того, ипотечные пакеты, которые впоследствии оказались явно проблемными (низкого качества), нашли своих покупателей. Если бы глобальный кризис был предreshен, этих покупателей просто не было бы. К тому же, хотя после 2002 года коэффициенты заемного капитала выросли, они были ненамного выше, чем в 1998-м. Что же касается надежд на финансовую помощь государства, то когда 15 сентября 2008 года банк Lehman Brothers потерпел крах, правительство не вмешивалось в происходящее, несмотря на то что это было самое крупное банкротство в истории США, так как стоимость активов холдинговой компании Lehman Brothers составляла более 600 миллиардов долларов.

Ло считает, что каждое из этих объяснений содержит логический пробел. Сами по себе данные не указывают на преимущество какого-то из них. Ло подытоживает свои выводы так: «Мы должны стремиться изначально иметь как можно больше интерпретаций одной и той же совокупности объективных данных в расчете на то, что в свое время получим более детальное и внутренне согласующееся объяснение кризиса». Далее он говорит: «Только сформировав разноплановый набор нередко противоречивых интерпретаций, мы в итоге придем к более полному пониманию причин кризиса» [11]. Какой-либо одной отдельно взятой модели для этого будет недостаточно.

В своей книге *Essence of Decision** Грэм Аллисон применяет многомодельный подход для объяснения причин Карибского кризиса.** Подготовленная

* Издана на русском языке: Зеликов Ф., Аллисон Г. Квинтэссенция решения. На примере Карибского кризиса 1962 года. М.: ЛКИ, 2012. *Прим. ред.*

** См. также по теме: Диксит А., Скит С., Рейли Д. Стратегические игры. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. *Прим. ред.*

ЦРУ военизированная группа 17 апреля 1961 года высадилась на берегу Кубы, предприняв неудавшуюся попытку свержения коммунистического режима Фиделя Кастро, что усилило напряженность между Соединенными Штатами и Советским Союзом, который поддерживал Кубу. В ответ глава советского правительства Никита Хрущев перебросил на Кубу ядерные ракеты малой дальности. Президент Джон Кеннеди отреагировал на это блокадой Кубы. Советский Союз и США пошли навстречу друг другу и пересмотрели ситуацию, в результате кризис благополучно завершился.

Аллисон интерпретирует эти события с помощью трех моделей. Первая — модель рационального выбора — показывает, что у Кеннеди было три варианта действий: развязать ядерную войну, вторгнуться на Кубу или ввести блокаду. Он выбрал блокаду. Модель рационального выбора подразумевает, что Кеннеди рисует дерево игры, отображающее каждый вариант действий и возможную реакцию СССР. Затем Кеннеди анализирует, каким будет оптимальный ответный ход Советского Союза. Например, если бы Кеннеди предпринял ядерный удар, Советы нанесли бы ответный удар, что привело бы к гибели миллионов людей. Если бы Кеннеди ввел блокаду, это обрекло бы кубинцев на голод. В этом случае Советский Союз либо отступил бы, либо запустил ракеты. При таком выборе СССР должен был пойти на уступки. Эта модель объясняет главную стратегическую логику игры и обосновывает решение Кеннеди в пользу блокады Кубы.

Однако, как и все модели, она неправильна, поскольку не учитывает важных деталей, из-за чего первоначальное объяснение выглядит лучше, чем на самом деле. В модели игнорируется этап размещения Советским Союзом ракет на Кубе. Если бы СССР вел себя более рационально, они нарисовали бы такое же дерево, как и Кеннеди, и осознали бы, что придется вывести ракеты. Кроме того, модель рационального выбора не объясняет, почему СССР не спрятал ракеты.

Для разъяснения этих противоречий Аллисон использует модель организационного процесса. Отсутствие организационных возможностей поясняет неспособность Советского Союза разместить ракеты в укрытиях. Эта же модель может объяснить решение Кеннеди ввести блокаду. В то время ВВС США не имели возможности уничтожить ракеты одним ударом. Даже одна уцелевшая ракета грозила погубить миллионы американцев. Аллисон умело сочетает обе модели. Выводы, сделанные на основании модели организационных процессов, меняют выигрыши в модели рационального выбора.

Аллисон использует также модель бюрократической политики. Две первые модели сводят страны к их лидерам: Кеннеди действует от имени США, а Хрущев — от имени СССР. Модель бюрократической политики признает, что Кеннеди приходится отстаивать свою позицию в конгрессе, а Хрущеву — сохранять политическую базу поддержки. Таким образом, размещение Хрущевым ракет на Кубе было демонстрацией силы.

Книга Аллисона показывает эффективность отдельных моделей и их комбинации. Каждая модель проясняет наше мышление. Модель рационального выбора позволяет определить возможные действия после размещения ракет и их последствия. Организационная модель подчеркивает тот факт, что эти действия выполняют организации, а не отдельные люди. Модель бюрократической политики обращает внимание на политическую цену вторжения. Такой трехсторонний анализ позволяет достичь более полного и глубокого понимания. Все модели неправильны, но их совокупность способна принести пользу.

В обоих примерах разные модели объясняют различные причинно-следственные факторы. Множество моделей могут также фокусироваться на событиях разных масштабов. В известной истории ребенок заявляет, что Земля покоится на спине гигантского слона. Ученый спрашивает ребенка, на чем стоит слон, на что ребенок отвечает: «На гигантской черепахе». Предвидя, что последует дальше, ребенок быстро добавляет: «Даже не спрашивайте. Там одни черепахи до самого конца» [12]. Если бы мир состоял из одних черепах (другими словами, был бы самоподобным), то модель верхнего уровня была бы применима на всех остальных уровнях. Однако экономика, мир политики и общество — это не только черепахи. То же самое можно сказать и о мозге. На субмикронном уровне мозг состоит из молекул, образующих синапсы, которые, в свою очередь, образуют нейроны*. Нейроны объединяются в сети. Сети накладываются друг на друга замысловатыми способами, которые можно изучить посредством нейровизуализации. Нейронные сети существуют на уровне, отличном от уровня функциональных систем, таких как мозжечок, например. Учитывая, что головной мозг имеет особую структуру на каждом уровне, нам необходимо множество моделей — и они разнятся.

* Синапсы — это оконечные образования нейронов, с помощью которых нервные импульсы передаются от одного нейрона к другому. Некорректно говорить, что синапсы образуют нейроны — это разные структуры.

Прим. ред.

У моделей, характеризующих устойчивость нейронных сетей, мало общего с моделями молекулярной биологии, служащими для объяснения работы клеток головного мозга, которые, в свою очередь, отличаются от психологических моделей, применяемых для объяснения когнитивных искажений.

Успех многомодельного мышления зависит от степени разделимости. В процессе анализа финансового кризиса 2008 года мы полагались на отдельные модели покупки активов зарубежными инвесторами, группирования активов и повышения коэффициента левериджа. Аллисон сделал выводы из теоретико-игровой модели без учета организационной модели. Изучая организм человека, врачи выделяют скелетную, мышечную, лимбическую и нервную систему. Тем не менее многомодельное мышление не требует, чтобы отдельные модели разделяли систему на независимые части. Столкнувшись со сложной системой, мы не можем, перефразируя Платона, разделять мир по его сочленениям. Мы можем частично выделить основные причинно-следственные нити, а затем изучить, как они переплетаются. При этом мы обнаружим, что данные, сгенерированные экономической, политической и социальной системой, демонстрируют внутреннюю согласованность. Социальные данные — это нечто большее, чем коллекция непостижимых историй из личной жизни.

АННОТАЦИЯ И КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ КНИГИ

Итак, мы живем в эпоху изобилия информации и данных. Генерирующие их технологические достижения сокращают время и расстояние, делая экономических, политических и социальных агентов* более динамичными, способными мгновенно реагировать на экономические и политические события. Кроме того, они усиливают связанность, а значит, и сложность. В результате возник технологический парадокс: мы знаем об окружающем мире больше, но мир стал сложнее. С учетом этой сложности любая отдельная модель, скорее всего, потерпит неудачу. Тем не менее нам не следует отказываться

* Большинство англоязычных исследователей для обозначения действующих лиц экономических, социальных и политических событий используют термин *актор*. В русскоязычном сегменте научного мира предпочитают *агент*. Хотя между этими словами есть определенные различия, мы будем их использовать в данной книге как синонимы. *Прим. ред.*

от моделей. Напротив, мы должны отдавать предпочтение логической связности перед интуицией, а также в два, три и даже четыре раза активнее использовать модели, придерживаясь многомодельного мышления.

А для этого понадобится изучить множество моделей, получив о них практические знания; понять их формальное описание и знать, как их применять. Однако нам не нужно быть экспертами. Поэтому в книге и соблюдается баланс между доступностью и глубиной. Она может служить как источником информации, так и руководством. Формальное описание моделей размещено в специальных врезках. В книге нет многострочных уравнений, которые ужаснут даже самых самоотверженных читателей. Представленные математические формулировки подлежат анализу и усвоению. Моделирование — это мастерство, для овладения которым нужна полная вовлеченность. Оставаясь страстным болельщиком, вы его не достигнете. Нужна осознанная практика. В моделировании математика и логика играют роль опытного тренера и исправляют наши ошибки.

Оставшаяся часть книги организована следующим образом. В главах 2 и 3 обосновывается целесообразность многомодельного подхода. В главе 4 рассказывается о проблемах моделирования поведения людей. Следующие двадцать с лишним глав посвящены отдельным моделям или классам моделей. Рассматривая по одному типу моделей за раз, вы сможете лучше осмыслить области их применения, исходные предположения и последствия. Кроме того, такая структура изложения материала позволяет в любой момент взять книгу с книжной полки или открыть ее в браузере и найти исчерпывающий анализ линейных моделей, прогностических моделей, сетевых моделей, моделей последствий, а также моделей распределения с длинным хвостом, обучения, пространственной конкуренции, потребительских предпочтений, зависимости от первоначально выбранного пути, инноваций и экономического роста. Во всех главах приводятся примеры применения многомодельного мышления для решения различных задач и проблем. Книга завершается глубоким анализом эпидемии опиоидов и неравенства в распределении доходов.