

Содержание

Предисловие	6
Введение: Ум важнее данных.....	8
Глава 1. Лестница причинности	32
Глава 2. От государственных пиратов до морских свинок: становление причинного вывода	62
Глава 3. От доказательств к причинам. Преподобный Байес знакомится с мистером Холмсом.....	106
Глава 4. Осложнители и наоборот: как убить прячущуюся переменную.....	151
Глава 5. Дымные дебаты: на свежий воздух.....	186
Глава 6. Сплошные парадоксы!.....	209
Глава 7. За пределами поправок: покорение горы интервенции	242
Глава 8. Контрфактивные суждения: глубинный анализ миров, которые могли бы существовать	288
Глава 9. Опосредование: в поисках механизма действия.....	332
Глава 10. Большие данные, искусственный интеллект и важные вопросы.....	388
Благодарности	413
Заметки.....	416
Библиография	419

Предисловие

Почти два десятилетия назад, работая над предисловием к книге «Причинность» (2000), я сделал довольно смелое замечание, после которого друзья посоветовали мне умерить пыл. Я написал: «Причинность пережила важнейшую трансформацию — от понятия, овеянного тайной, до математического объекта с хорошо определенным смыслом и хорошо обоснованной логикой. Парадоксы и противоречия были разрешены, туманные понятия были истолкованы, а связанные с причинностью практические задачи, которые долго считались или метафизическими, или нерешаемыми, теперь могут быть разрешены при помощи элементарной математики. Проще говоря, причинность была математизирована».

Перечитывая этот отрывок сегодня, я чувствую, что был весьма близорук. Явление, описанное мной как «трансформация», оказалось «революцией», которая изменила мышление ученых в самых разных науках. Многие сегодня называют это Революцией Причинности, и волнение, которое она вызвала в кругах исследователей, сейчас распространяется на образование и практическую сферу.

У этой книги тройная задача: во-первых, описать для вас нематематическим языком интеллектуальную суть Революции Причинности и показать, как она влияет на нашу жизнь

и на будущее; во-вторых, рассказать о героических путешествиях, как успешных, так и неудачных, в которые отправились некоторые ученые, столкнувшись с важнейшими вопросами, касающимися причинно-следственных связей.

Наконец, возвращая Революцию Причинности к ее истокам в сфере искусственного интеллекта (ИИ), я ставлю целью показать вам, как можно создать роботов, способных общаться на нашем родном языке — языке причины и следствия. Это новое поколение роботов должно объяснить нам, почему случились определенные события, почему они откликнулись определенным образом и почему природа действует так, а не иначе. Более амбициозная цель — узнать от них, как устроены мы сами: почему наш ум срабатывает именно так и что значит думать рационально о причине и следствии, вере и сожалении, намерении и ответственности.

Когда я записываю уравнения, у меня есть очень четкое представление о том, кто мои читатели. Но если я пишу для широкой публики, его нет, и это для меня совершенно новое приключение. Странно, но такой новый опыт стал одним из самых плодотворных образовательных усилий в моей жизни. Необходимость выразить идеи на вашем языке, думать о вашем опыте, ваших вопросах и ваших реакциях обострила мое понимание причинности больше, чем все уравнения, которые я написал до того, как создал эту книгу.

За это я буду вечно благодарен. И надеюсь, что вам так же, как и мне, не терпится увидеть результаты.

*Джудиа Перл, Лос-Анджелес,
октябрь 2017 года*

Введение: Ум важнее данных

*Любая развитая наука смогла развиваться
благодаря собственным символам.
Огастес де Морган, 1864*

Эта книга рассказывает историю науки, которая повлияла на то, как мы отличаем факты от вымысла, и осталась при этом вне поля зрения широкой публики. Новая наука уже определяет важнейшие аспекты нашей жизни и потенциально может повлиять на многое другое: от разработки новых лекарств до управления экономическим курсом, от образования и робототехники до контроля над оборотом оружия и глобальным потеплением. Примечательно, что, несмотря на разнообразие и явную несоизмеримость этих областей, новая наука собирает их все в рамках единой структуры, которой практически не существовало два десятилетия назад.

У нее нет красивого названия — я называю ее просто причинным анализом, как и многие коллеги. Не особо высокотехнологичный термин. Идеальная технология, которую пытается моделировать причинный анализ, есть у нас в голове. Десятки тысяч лет назад люди начали понимать, что одни вещи приводят к другим вещам и что, регулируя первое, можно повлиять на второе. Ни один биологический вид, кроме нашего, не осознает этого — по крайней мере, до такой степени. Это открытие

породило организованные общества, потом города и страны и наконец-то цивилизацию, основанную на науке и технике, которая есть у нас сегодня. И все потому, что мы задали простой вопрос: почему? Причинный анализ относится к этому вопросу очень серьезно. Он исходит из предпосылки о том, что человеческий мозг — самый продвинутый инструмент из когда-либо созданных для работы с причинами и следствиями. Мозг хранит невероятный объем знаний о причинности, и, поддержав его данными, можно использовать этот орган для ответа на самые насущные вопросы нашего времени. Более того, как только мы действительно поймем логику, стоящую за рассуждениями о причинах, мы будем способны имитировать ее в современных компьютерах и создать «искусственного ученого». Этот умный робот откроет еще неизвестные феномены, найдет объяснения для неразрешенных научных дилемм, разработает новые эксперименты и будет постоянно извлекать новые знания о причинах явлений из окружающей среды.

Но прежде, чем мы начнем размышлять о подобных футуристических достижениях, важно понять достижения, к которым уже привел нас причинный анализ. Мы исследуем, как он преобразил мышление ученых почти во всех дисциплинах, основанных на работе с данными и как это вскоре изменит нашу жизнь. Новая наука занимается довольно однозначными на первый взгляд вопросами вроде таких:

- Насколько эффективно данное лечение для предотвращения болезни?
- Что вызвало рост продаж — новый закон о налогообложении или наша рекламная кампания?
- Как ожирение влияет на траты на медицинское обслуживание?
- Могут ли данные о найме сотрудников служить доказательством последовательной дискриминации по половому признаку?
- Я собираюсь уволиться. Стоит ли это делать?

Во всех этих вопросах видна озабоченность причинно-следственными отношениями, которую можно узнать по таким словам, как «предотвращения», «вызвало», «влияет», «последовательной» и «стоит ли». Эти слова часто встречаются в повседневном языке, и наше общество постоянно требует ответы на эти вопросы. Но до недавнего времени наука не давала нам средств, чтобы даже выразить их, не говоря уже о том, чтобы на них ответить.

Наука о причинном анализе оставила это пренебрежение со стороны ученых в прошлом, и в этом состоит ее важнейшее достижение на благо человечество. Новая наука породила простой математический язык, чтобы выражать каузальные отношения — и те, о которых мы знаем, и те, о которых хотели бы узнать. Возможность выразить эту информацию в математической форме открыла изобилие мощных, основанных на твердых принципах методов, которые позволяют сочетать наше знание с данными и отвечать на каузальные вопросы вроде пяти, приведенных выше.

Мне повезло участвовать в развитии этой научной дисциплины в течение последней четверти века. Я наблюдал, как она оформляется в студенческих аудиториях и исследовательских лабораториях, и видел, как ее прорывы сотрясают угрюмые научные конференции вдали от софитов общественного внимания. Сейчас, когда мы вступаем в эру сильного искусственного интеллекта, многие славят бесконечные возможности, которые открывают большие массивы данных и технологии глубинного обучения. Я же нахожу своевременной и волнующей возможность представить читателю смелые пути, которыми идет новая наука, и рассказать, как она влияет на науку о данных и какими разнообразными способами изменит нашу жизнь в XXI веке.

Вероятно, когда вы слышите, что я называю эти достижения новой наукой, у вас появляется скепсис. Вы можете даже спросить: почему она не появилась давным-давно? Например, когда Вергилий провозгласил: «Счастлив тот, кто смог понять причины вещей» (29 год до н.э.). Или когда основатели современной статистики Фрэнсис Гальтон и Карл Пирсон впервые открыли, что данные о населении могут пролить свет на науч-

ные вопросы. Кстати, за их досадной неспособностью учесть причинность в этот ключевой момент стоит долгая история, которую мы рассмотрим в исторических разделах этой книги. Однако самым серьезным препятствием, с моей точки зрения, было фундаментальное расхождение между языком, на котором мы задаем вопросы о причинности, и традиционным языком, которым описываем научные теории.

Чтобы оценить глубину этого расхождения, представьте трудности, с которыми столкнется ученый, пытаясь объяснить некоторые очевидные причинные отношения, скажем, что барометр, показывающий B , считывает давление P . Это отношение легко записать уравнением $B = kP$, где k — некий коэффициент пропорциональности. Правила алгебры теперь позволяют нам переписать это уравнение в самых разных формах, скажем $P = B/k$, $k = B/P$ или $B - kP = 0$. Все они означают одно и то же: если мы знаем любые две из трех величин, третья определена. Ни одна из букв k , B или P не имеет преимуществ перед остальными с математической точки зрения. Но как же выразить наше сильное убеждение в том, что давление заставляет показания барометра измениться, а не наоборот? А если мы не способны выразить даже это, как же сформулировать другие наши убеждения о причинно-следственных отношениях, у которых нет математических формул? Например, о том, что от кукареканья петуха солнце не встает?

Мои преподаватели в университете не могли этого сделать, но никогда не жаловались. Я готов поспорить, что ваши тоже. И сейчас мы понимаем почему: им никогда не показывали математический язык причинности и никогда не рассказывали о его пользе. Более того, это обвинительный приговор науке, которая в течение стольких поколений игнорировала необходимость подобного языка. Все знают, что если щелкнуть выключателем, то зажжется свет, и что в жаркий и душный день в местном кафе-мороженом поднимутся продажи. Почему же ученые до сих пор не выразили такие очевидные факты в формулах, как это было сделано с базовыми законами оптики, механики или геометрии? Почему они допустили, чтобы эти факты чахли, ограниченные голой интуицией и лишённые

математических инструментов, которые позволили другим наукам зреть и процветать?

Отчасти ответ в том, что научные инструменты развиваются, дабы удовлетворять научные потребности. Именно потому, что мы так хорошо управляемся с вопросами о выключателях, мороженом и барометрах, наша потребность в особых математических инструментах, чтобы их решать, была неочевидной. Но по мере того, как научное любопытство увеличилось и мы начали задавать вопросы о причинности в сложных юридических, деловых, медицинских и политических ситуациях, оказалось, что у нас не хватает инструментов и принципов, которые должна предоставить зрелая наука.

Запоздалое пробуждение такого рода нередко встречается в науке. Например, вплоть до середины XVII века люди вполне удовлетворялись своей способностью справляться с неопределенностью в повседневной жизни — от перехода улицы до риска подраться. Только когда азартные игроки изобрели изощренные игры, порой тщательно нацеленные на то, чтобы вынудить других сделать неверный выбор, математики Блез Паскаль (1654), Пьер Ферма (1654) и Христиан Гюйгенс (1657) посчитали необходимым развить то, что сегодня мы называем теорией вероятностей. Подобным образом лишь тогда, когда страховым организациям потребовалось точно рассчитать пожизненную ренту, такие математики, как Эдмунд Галлей (1693) и Абрахам де Муавр (1725), использовали данные о смертности, чтобы вычислить ожидаемую продолжительность жизни. Аналогично потребности астрономов в точном предсказании движения небесных тел подтолкнули Якоба Бернулли, Пьера Симона Лапласа и Карла Фридриха Гаусса разработать теорию ошибок, которая помогает выделить сигналы из шума. Все эти методы — предшественники сегодняшней статистики.

Удивительно, но потребность в теории причинности начала оформляться в то же время, когда появилась статистика. Более того, современная статистика родилась из вопросов о причинах, которые Гальтон и Пирсон задавали применительно к наследственности, и из их изобретательных попыток на них ответить, используя данные о нескольких поколениях. К сожа-

лению, попытка не удалась, и вместо того, чтобы остановиться и спросить почему, они объявили эти вопросы недоступными для изучения и занялись развитием процветающей, свободной от причинности области под названием «Статистика».

Это был важнейший момент в истории науки. Возможность решать вопросы причинности на ее собственном языке почти воплотилась, однако ее растратили напрасно. В последующие годы эти вопросы были объявлены ненаучными и отправлены в подполье. Несмотря на героические усилия генетика Сьюалла Райта (1889—1988), вокабуляр причинности был буквально запрещен больше чем на 50 лет. А запрещая речь, вы запрещаете мысль и душите принципы, методы и инструменты.

Читателям этой книги не надо быть учеными, чтобы увидеть данный запрет своими глазами. Осваивая курс «Введение в статистику», каждый студент учится повторять: «Корреляция не означает причинно-следственную связь». И этому есть хорошее объяснение! Кукареку петуха тесно коррелирует с рассветом, но не является его причиной.

К сожалению, в статистике это здравое наблюдение стало фетишем. Оно сообщает нам, что корреляция не означает причинно-следственную связь, но не говорит нам, что такое эта причинно-следственная связь. Попытки найти раздел «Причина» в учебниках по статистике обречены на неудачу. Студентом не разрешается говорить, что X причина Y , — только что X и Y «связаны» или «ассоциируются».

Из-за этого запрета математические инструменты для работы с вопросами причинности были признаны излишними, и статистика сосредоточилась исключительно на обобщении данных, а не на их интерпретации. Блестящим исключением стал путевой анализ, изобретенный генетиком Сьюаллом Райтом в 1920-е годы — прямой предок методов, которые мы рассмотрим в этой книге. Однако путевой анализ не получил должной оценки в статистике и сопряженных сообществах и десятилетиями пребывал в состоянии эмбриона. То, что должно было стать первым шагом по направлению к причинному анализу, оставалось единственным шагом до 1980-х годов. Остальная статистика, а также многие дисциплины, которые

на нее ориентировались, так и жили в эпоху этого «сухого закона», ошибочно полагая, что ответы на все научные вопросы кроются в данных и должны быть открыты с помощью умных способов их интерпретировать.

Эта ориентация на данные до сих пор преследует нас. Мы живем в эпоху, когда большие данные считаются потенциальным решением для всех проблем. Курсы по теории и методам анализа данных в изобилии преподаются в наших университетах, а компании, участвующие в «экономике данных», готовы платить хорошие деньги специалистам в этих вопросах. Но я надеюсь убедить вас этой книгой, что данные — вещь крайне тупая. Они могут рассказать вам, что люди, которые приняли лекарство, восстановились быстрее, чем те, кто его не принимал, но не могут рассказать почему. Может, те, кто принял лекарство, сделали так, поскольку были в состоянии позволить это себе, но восстановились бы столь же быстро и без него.

Снова и снова в науке и бизнесе мы наблюдаем ситуации, в которых одних данных недостаточно. Большинство энтузиастов, работающих со значительными массивами данных, осознавая порой эти ограничения, продолжают ориентироваться на искусственный интеллект, обрабатывающий данные, как будто альтернатива все еще под запретом.

Как я говорил выше, за последние 30 лет ситуация радикально изменилась. Сегодня, благодаря тщательно созданным причинным моделям, современные ученые могут обратиться к проблемам, которые когда-то сочли бы нерешаемыми или даже не подходящими для научного изучения. Например, всего 100 лет назад вопрос о том, вредит ли здоровью курение сигарет, был бы признан ненаучным. Одно упоминание слов «причина» и «следствие» вызвало бы лавину возражений в любом авторитетном журнале о статистике.

Еще 20 лет назад задать статистику вопрос вроде «Это аспирин помог мне от головной боли?» было все равно, что спросить, верит ли он в магию вуду. Как выразился мой почтенный коллега, это была бы «скорее тема для светской беседы, а не научный запрос». Но сегодня эпидемиологи, обществоведы,

специалисты по компьютерным наукам и, по крайней мере, некоторые просвещенные экономисты и статистики регулярно ставят такие вопросы и отвечают на них с математической точностью. Для меня эти перемены равнозначны революции. Я осмеливаюсь называть их Революцией Причинности, научной встряской, которая позволяет принимать, а не отрицать наш врожденный когнитивный дар понимать причины и следствия.

Революция Причинности произошла не в вакууме; за ней стоит математический секрет, который лучше всего можно описать как численные методы причинности; они отвечают на самые сложные вопросы, когда-либо заданные о причинно-следственных отношениях. Я открываю эти методы с большим волнением — не только потому, что бурная история их появления весьма интригует, но и в большей степени потому, что, по моим ожиданиям, в будущем их потенциал раскроют, опередив самые смелые мечты, и... вероятно, это сделает один из читателей настоящей книги.

Вычислительные методы причинности включают два языка: диаграммы причинности, которые выражают то, что мы знаем, и символический язык, напоминающий алгебру, который выражает то, что мы хотим узнать. Диаграммы причинности — простые рисунки из точек со стрелками, которые обобщают существующее научное знание. Точки символизируют интересующие нас факторы под названием «переменные», а стрелки — известные или подразумеваемые причинные отношения между ними, означающие, к каким переменным «прислушивается» та или иная переменная. Такие диаграммы невероятно легко рисовать, понимать и использовать, и читатели обнаружат их в изобилии на страницах этой книги. Если вы сможете найти дорогу по карте улиц с односторонним движением, то поймете диаграммы причинности и ответите на вопросы, относящиеся к тому же типу, что и заданные в начале этого вступления.

Диаграммы причинности, которые я предпочитаю использовать в этой книге и выбираю в качестве основного инструмента в последние 35 лет, не единственная модель причинности. Некоторые ученые (например, специалисты по эконометри-