



СТАНИСЛАС ДЕАН

нейробиолог, доктор наук

КАК МЫ УЧИМСЯ

Почему мозг учится лучше,
чем любая машина... пока



Annotation

Любознательность и способность учиться – дар эволюции человека. До сих пор ни одна из искусственных нейронных сетей не в состоянии воспроизвести самую элементарную информацию, которой владеет даже младенец. В этой книге французский нейробиолог Станислас Деан рассказывает, что в действительности скрывается за природной тягой людей к знаниям. Понимание ее особенностей, роли восприятия, ошибок, памяти и внимания в обучении – сила, которая позволит раскрыть наш потенциал в школе, на работе и в повседневной жизни.

В формате PDF A4 сохранен издательский макет.

- [Станислас Деан](#)
 - [Введение](#)
 - [Зачем учиться?](#)
 - [Homo docens](#)
 - [Научение научению](#)
 - [Человек и машина](#)
 - [Часть I](#)
 - [Глава 1](#)
 - [Научение – это регулировка параметров ментальной модели](#)
 - [Научение – это использование комбинаторного взрыва](#)
 - [Научение – это минимизация ошибок](#)
 - [Научение – это исследование пространства возможностей](#)
 - [Глава 2](#)
 - [Чего не хватает искусственному интеллекту?](#)
 - [Учиться – значит логически выводить основы](#)
 - [Учиться – значит рассуждать как ученый](#)
 - [Часть II](#)
 - [Глава 3](#)
 - [Понятие о физических объектах](#)
 - [Чувство числа](#)
 - [Интуитивные представления о вероятностях](#)
 - [Знания о людях и животных](#)
 - [Восприятие лиц](#)
 - [Языковой инстинкт](#)
 - [Глава 4](#)
 - [Организация мозга младенца](#)
 - [Речевые «магистралы»](#)
 - [Самоорганизация коры](#)
 - [Истоки индивидуальности](#)
 - [Глава 5](#)
 - [Память](#)
 - [Истинные синапсы и ложные воспоминания](#)
 - [Питание как ключевой элемент научения](#)
 - [Возможности и ограничения синаптической пластичности](#)
 - [Что такое сензитивный период?](#)
 - [Приемные дети и совы-очки](#)
 - [Чудо в Бухаресте](#)

- [Глава 6](#)
 - [Гипотеза нейронного рециклинга](#)
 - [Математика и рециклинг системы, отвечающей за чувство числа](#)
 - [Чтение и рециклинг системы, отвечающей за зрение и устную речь](#)
 - [Музыка, математика и лица](#)
 - [Роль обогащенной среды](#)
- [Часть III](#)
 - [Глава 7](#)
 - [Система сигнализации и активации: пробуждение мозга](#)
 - [Система ориентировки: фильтр мозга](#)
 - [Система управляющего контроля: пульт управления мозга](#)
 - [Управление вниманием](#)
 - [Я обращаю внимание, если ты обратишь внимание](#)
 - [Обучение – это внимание к знаниям других](#)
 - [Глава 8](#)
 - [Пассивный организм не учится](#)
 - [Научение и глубина обработки информации](#)
 - [Неэффективность научения через открытия](#)
 - [Любопытство и как его разжечь](#)
 - [Желание знать как источник мотивации](#)
 - [Как школа убивает любознательность: три сценария](#)
 - [Глава 9](#)
 - [Удивление – движущая сила научения](#)
 - [Мозг кишит сообщениями об ошибке](#)
 - [Обратная связь по ошибкам не синонимична наказанию](#)
 - [Отметки – плохой аналог обратной связи по ошибкам](#)
 - [Испытайте самих себя\[35\]](#)
 - [Метод интервального повторения](#)
 - [Глава 10](#)
 - [Высвобождение ресурсов мозга](#)
 - [Ключевая роль сна](#)
 - [Спящий мозг заново переживает прошедший день](#)
 - [Открытия во сне](#)
 - [Сон, детство и школа](#)
- [Заключение](#)
 - [Тринадцать напутствий, которые позволят развить детский потенциал](#)
 - [Школы будущего](#)
- [Благодарности](#)
- [Библиография](#)
- [Перечень иллюстраций](#)
- [Примечания](#)
- [Алфавитный указатель](#)
- [Иллюстрации](#)
-
- [notes](#)
 - [1](#)
 - [2](#)
 - [3](#)
 - [4](#)
 - [5](#)
 - [6](#)
 - [7](#)
 - [8](#)

- [9](#)
 - [10](#)
 - [11](#)
 - [12](#)
 - [13](#)
 - [14](#)
 - [15](#)
 - [16](#)
 - [17](#)
 - [18](#)
 - [19](#)
 - [20](#)
 - [21](#)
 - [22](#)
 - [23](#)
 - [24](#)
 - [25](#)
 - [26](#)
 - [27](#)
 - [28](#)
 - [29](#)
 - [30](#)
 - [31](#)
 - [32](#)
 - [33](#)
 - [34](#)
 - [35](#)
 - [36](#)
 - [37](#)
-

Станислас Деан

**Как мы учимся : почему мозг учится лучше, чем
любая машина... пока**

*Посвящается Авроре, которая родилась в этом году,
а также всем взрослым, которые когда-то были детьми.*

*Прежде всего хорошо изучите ваших воспитанников, ибо вы
решиительно их не знаете.*

Жан-Жак Руссо,

«Эмиль, или О воспитании» (1762)

*Странный и удивительный факт: мы изучили каждый
сантиметр человеческого тела, составили каталог всех животных,
населяющих нашу планету, дали описание и придумали название
каждой травинке, но веками довольствовались эмпирическим
подходом к психологии, как будто она менее важна, чем искусство
лекаря, животновода или фермера.*

Жан Пиаже,

«Современная педагогика» (1949)

*Если мы не знаем, как мы учимся, откуда нам знать, как
преподавать?*

Л. Рафаэль Райф,

*ректор Массачусетского технологического института (23
марта 2017)*

Stanislas Dehaene

HOW WE LEARN

Copyright © 2020 by Stanislas Dehaene. All rights reserved

Научный редактор

И. Захаров,

старший научный сотрудник лаборатории возрастной психогенетики Психологического
института РАО

© Чечина А.А., перевод на русский язык, 2020

© Оформление. ООО «Издательство «Эксмо», 2021

«Каждая книга известного французского психофизиолога Станисласа Деана – это событие. Не стала исключением и эта. В ней рассматриваются важнейшие вопросы когнитивной нейронауки: как происходит научение, как мы приобретаем новые знания, чем работа мозга во время обучения отличается от работы компьютера? Несмотря на столь сложную тему, книга написана чрезвычайно ярким и доступным языком, при этом в ней полностью сохранена научная точность и аккуратность при изложении фактов и теорий. Важно отметить, что Станислас Деан не просто перечисляет те или иные факты по теме, но и

предлагает собственную оригинальную гипотезу «нейронного рециклинга», позволяющую совершенно по-новому взглянуть на многие, казалось бы давно известные наблюдения. Думаю, что я непременно буду рекомендовать эту книгу своим студентам».

Станислав Козловский,

доцент кафедры психофизиологии факультета

психологии МГУ имени М.В. Ломоносова

Введение

В сентябре 2009 года я познакомился с одним удивительным ребенком. Именно он заставил меня в корне пересмотреть мои представления о научении. Я был в огромном белом здании, вдохновленном архитектурой Оскара Нимейера^[1], – Неврологическом реабилитационном центре имени Сары Кубичек в Бразилии, с которым моя лаборатория сотрудничала уже около десяти лет. Директор, Лючия Брага, отвела меня к одному из пациентов – семилетнему мальчику Фелипе, который пролежал на больничной койке больше половины своей жизни. В возрасте четырех лет его ранили на улице – к сожалению, это не такое уж редкое событие в Бразилии. Шальная пуля повредила спинной мозг и уничтожила зрительные центры в головном мозге. В результате малыш полностью утратил подвижность и ослеп. Чтобы ему было легче дышать, врачи проделали в его трахее – у самого основания шеи – небольшое отверстие. Вот уже три года Фелипе жил в больничной палате, запертый в тюрьме собственного неподвижного тела.

Помню, как, идя по коридору, я мысленно приготовился увидеть несчастного, искалеченного ребенка. А потом я увидел... Фелипе, такого же очаровательного маленького мальчика, как и все семилетние дети: разговорчивого, жизнерадостного и любознательного. Он свободно говорил на английском языке и задал мне несколько каверзных вопросов о французских словах. Оказывается, ему всегда нравились языки, и он никогда не упускал возможности пополнить свой словарный запас (малыш владел тремя языками: португальским, английским и испанским). Хотя Фелипе был слеп и прикован к постели, он нашел спасение в воображении и сочинял чудесные истории. Персонал больницы активно поддерживал его увлечение и всячески старался ему помочь. Через несколько месяцев Фелипе научился диктовать свои рассказы помощнику, а позже стал записывать их самостоятельно – с помощью специальной клавиатуры, подключенной к компьютеру и звуковой карте. Педиатры и логопеды по очереди дежурили у детской кроватки, превращая его сочинения в настоящие тактильные книги с рельефными иллюстрациями. Я видел, как он гордо перелистывает их пальчиками, используя те крохи осязания, которые у него остались. Его истории повествуют о героях и героинях, горах и озерах, которые он никогда не увидит, но о которых мечтает, как любой маленький мальчик.

Встреча с Фелипе глубоко тронула меня, а также убедила внимательнее присмотреться к тому, что, вероятно, следует считать величайшим талантом нашего мозга: способности учиться. Фелипе – ребенок, само существование которого бросает вызов нейронауке. Как когнитивные способности нашего мозга умудряются противостоять столь радикальному изменению среды? Почему мы с Фелипе можем мыслить схожим образом, хотя наш сенсорный опыт в корне различен? Как разные люди приходят к одним и тем же понятиям, почти независимо от того, как и когда происходит их усвоение?

Многие нейробиологи – убежденные эмпирики: вслед за английским философом эпохи Просвещения Джоном Локком (1632–1704) они настаивают, что мозг черпает все свои знания из внешнего мира. С этой точки зрения главным свойством корковых нейронных сетей^[2] должна быть пластичность, возможность адаптироваться к входным сигналам. И действительно, нервные клетки обладают поразительной способностью регулировать свои синапсы в ответ на поступающие импульсы. Однако будь это главным драйвером работы мозга, мой маленький Фелипе, лишенный постоянного притока зрительных и моторных сигналов, неизбежно стал бы весьма ограниченной личностью. Каким же чудом ему удалось развить совершенно нормальные когнитивные способности?

Случай Фелипе отнюдь не уникален. Всем известна история Хелен Келлер (1880–1968) и Мари Эртен (1885–1921): первая потеряла зрение и слух в младенчестве, вторая родилась глухой и слепой. Тем не менее спустя годы мучительной социальной изоляции обе освоили язык жестов и в конце концов стали блестящими мыслителями и писательницами¹. На страницах этой книги мы познакомимся со многими людьми, которые, я надеюсь, радикально изменят и ваши взгляды на научение. Один из них – выдающийся математик Эммануэль Жиру, потерявший зрение в одиннадцать лет. Перефразируя слова Лиса из «Маленького принца» Антуана де Сент-Экзюпери (1943), Жиру уверенно заявляет: «В геометрии самого главного глазами не увидишь. Зорок один лишь разум». Но как этот слепой человек вообще ориентируется в абстрактных пространствах алгебраической геометрии и так легко

манипулирует плоскостями, сферами и объемами, хотя даже не видит их? В ходе исследований мы выясним, что Эммануэль использует те же самые нейронные сети, что и другие математики, но его зрительная кора, вместо того чтобы оставаться неактивной, переквалифицировалась на решение задач.

Я также познакомлю вас с Нико – молодым художником, который, посетив музей Мармоттан в Париже, создал отличную копию знаменитой картины Моне «Впечатление. Восходящее солнце» (см. цветную иллюстрацию 1). Что же в этом такого исключительного, спросите вы. Ничего, лишь тот факт, что у Нико всего одно полушарие, левое, – правое было почти целиком удалено в возрасте трех лет! В итоге мозг Нико втиснул все свои таланты в оставшуюся половину: не только речь, письмо и чтение, как у обычных людей, но и рисование, которое обычно считается функцией правого полушария, а также компьютерные науки и даже фехтование на инвалидных колясках – вид спорта, в котором Нико получил звание чемпиона Испании. Забудьте все, что вам говорили о разделении обязанностей между полушариями: жизнь Нико доказывает, что любой человек без правого полушария может стать креативным и талантливым художником! Нейропластичность воистину творит чудеса.

Мы посетим печально известные детские дома Бухареста, где дети с рождения не получали практически никакого внимания – однако же годы спустя школьный опыт некоторых из них (преимущественно усыновленных до года или двух) оказался близок к нормальному.

Все эти примеры иллюстрируют необычайную гибкость человеческого мозга: даже такие тяжелые травмы, как слепота, потеря полушария и социальная изоляция, не могут лишить нас возможности учиться. Речь, чтение, математика, художественное творчество – все эти уникальные таланты человека, которыми не обладает ни один другой примат, успешно противостоят обширным повреждениям, включая удаление целого полушария, потерю зрения или утрату двигательных навыков. Поскольку научение – жизненно важный процесс, человеческий мозг наделен невероятной пластичностью – способностью к самоизменению, приспособлению. Тем не менее в некоторых случаях процесс научения буквально останавливается и не приводит к позитивным изменениям. Возьмем чистую алексию, неспособность прочесть ни единого слова. Я лично обследовал нескольких таких взрослых: все они прекрасно умели читать, но после инсульта, затронувшего крошечную область их мозга, утратили способность расшифровывать даже такие простые слова, как «дом» или «кот». Помню, среди них была умнейшая женщина – преданная поклонница французской газеты *Le Monde*. Она говорила на трех языках и была глубоко опечалена тем фактом, что отныне для нее любая газетная страница выглядит как китайская грамота. Несмотря на последствия перенесенного инсульта, женщина решила во что бы то ни стало научиться читать заново. И все же спустя два года усиленных тренировок ее навыки чтения по-прежнему остались на уровне детского сада: ей требовалось несколько секунд, чтобы прочесть одно слово, буква за буквой, и она спотыкалась на каждом слове. Почему она не могла научиться? И почему некоторые дети, страдающие дислексией, дискалькулией или диспраксией, не в состоянии овладеть навыками чтения, счета или письма, хотя другим они даются так легко?

Пластичность мозга капризна. Иногда она действительно позволяет преодолеть огромные трудности. А иногда дети и взрослые – умные и в высшей степени мотивированные – сохраняют мучительные нарушения на всю жизнь. Зависит ли это от конкретных нейронных сетей? Снижается ли пластичность с возрастом? Можно ли ее восстановить? Какие законы ею управляют? Чем обусловлена поразительная эффективность мозга с рождения и на протяжении всего детства? Какие алгоритмы позволяют нашим нейронным сетям формировать представления о мире? Поможет ли понимание принципов их действия учиться быстрее и лучше? Могут ли они вдохновить нас на создание более «умных» машин, искусственного интеллекта, который будет имитировать работу человеческого мозга или даже превзойдет его? На эти и другие вопросы я попытаюсь дать ответ в данной книге. В ее основу положен междисциплинарный подход: во всех наших рассуждениях мы прежде всего будем опираться на последние научные открытия в самых разных областях знаний: в когнитивистике, нейробиологии, в сфере искусственного интеллекта и педагогики.

Зачем учиться?

Почему мы вообще должны учиться? Сам факт того, что мы наделены способностью получать знания, вызывает вопросы. Разве не было бы лучше, если бы дети могли говорить и думать с самого первого дня, подобно Афине, которая, согласно легенде, появилась на свет из головы Зевса уже взрослой, в полном вооружении и, едва «роды» закончились, испустила боевой клич? Почему мы не рождаемся уже подготовленными, с предварительно загруженными поведенческими программами и знаниями, необходимыми для выживания? Разве в дарвиновской борьбе за жизнь у животного, которое рождается зрелым и обладает более обширными знаниями, чем другие, не больше шансов победить и распространить свои гены? Зачем эволюции понадобилось изобретать научение?

Я отвечаю так: предварительное программирование мозга и невозможно, и нежелательно. Невозможно? Но почему? Хотя бы потому, что для подробного кодирования всех наших знаний человеческой ДНК просто не хватило бы емкости. Наши двадцать три пары хромосом содержат три миллиарда пар «букв» А, С, G, Т – молекул аденина, цитозина, гуанина и тимина. Сколько информации они несут? Информация измеряется в битах, которые могут иметь два значения: 1 или 0. Поскольку каждая из четырех букв генома кодирует два бита (мы можем записать их как 00, 01, 10 и 11), наша ДНК содержит в общей сложности шесть миллиардов битов. Однако, как вы помните, в современных компьютерах мы считаем информацию байтами – последовательностями из восьми битов. Следовательно, человеческий геном можно свести примерно к 750 мегабайтам. Это емкость старомодного компакт-диска или небольшого USB-накопителя! И это при том, что в своих расчетах мы не учитывали многочисленные повторения, которыми изобилует наша ДНК.

Из столь скромного объема информации, унаследованного нами спустя миллионы лет эволюции, наш геном, изначально ограниченный одной-единственной оплодотворенной яйцеклеткой, выстраивает весь план организма – каждую молекулу каждой клетки в печени, почках, мышцах и, конечно же, в мозге: восемьдесят шесть миллиардов нейронов, тысячу триллионов связей... Как же ему это удастся? Если предположить, что каждое из наших нервных соединений кодирует только один бит (хотя это явное преуменьшение), емкость нашего мозга должна составлять около ста терабайт (или 10^{15} битов). Иными словами, его емкость в сто тысяч раз больше емкости нашего генома. Возникает парадокс: фантастический дворец, который представляет собой наш мозг, содержит в сто тысяч раз больше деталей, чем чертежи архитектора, которые используются для его постройки! Я вижу только одно объяснение: структурный каркас дворца возводится в соответствии с указаниями архитектора (генома), а детали находятся в ведении руководителя проекта, который корректирует план в зависимости от местности (окружающей среды). Поскольку с этой точки зрения предварительно описать человеческий мозг во всей его полноте невозможно, на помощь генам приходит научение.

Данная метафора, однако, не объясняет, почему научение столь распространено в животном мире. Даже простые организмы, вообще не имеющие коры головного мозга (например, дождевые черви, дрозофилы и морские огурцы), усваивают многие из присущих им форм поведения в результате научения. Рассмотрим маленького червячка под названием нематода, или *C. elegans*. За последние двадцать лет это миллиметровое животное стало настоящей лабораторной звездой: дело в том, что его строение в основном определяется генетически и может быть проанализировано вплоть до мельчайших подробностей. Большинство особей имеют ровно 959 клеток, включая 302 нейрона, все связи которых хорошо изучены. И все же нематоды учатся². Первоначально исследователи рассматривали это существо как своего рода робота, который только и умеет, что плавать взад-вперед, однако позже было установлено, что ему доступны по крайней мере два вида научения: привыкание (габитуация) и ассоциация. Габитуация относится к способности организма адаптироваться к повторяющемуся стимулу (например, к молекуле в воде, в которой живет животное) и постепенно переставать реагировать на него. Ассоциация, напротив, состоит в обнаружении и запоминании аспектов окружающей среды, служащих надежными предикторами источника пищи или опасности. Нематода – чемпион ассоциации: она, например, может вспомнить, какие вкусы, запахи или температуры ранее были связаны с пищей (бактерии) или с молекулами репеллента (запах чеснока), и использовать эту информацию для выбора оптимального маршрута движения.

При таком небольшом количестве нейронов поведение червя вполне можно было бы запрограммировать заранее. Но это не так. Причина в том, что способность приспосабливаться к специфической среде, в которой животное родилось, крайне полезна и даже необходима для его выживания. Даже два генетически идентичных организма необязательно окажутся в одной и той же экосистеме. В случае нематоды способность оперативно корректировать свое поведение в зависимости от плотности, химического состава и температуры места, в котором она очутилась, позволяет ей выбирать оптимальный курс действий. В более общем смысле всякое животное должно быстро адаптироваться к непредсказуемым условиям текущего окружения. Естественный отбор – чрезвычайно эффективный алгоритм, открытый Дарвином, – безусловно, содействует адаптации каждого организма к своей экологической нише, но делает это с ужасающе низкой скоростью. Целые поколения будут обречены на смерть, прежде чем некая полезная мутация увеличит шансы вида на выживание. Способность учиться, напротив, работает гораздо быстрее: она может изменить поведение в течение нескольких минут, что является самой квинтэссенцией научения – привить навык максимально быстро адаптироваться к непредсказуемым условиям.

Вот почему учиться так важно. В ходе эволюции животные, которые обладали даже зачаточной способностью к научению, имели больше шансов выжить, чем те, чье поведение было фиксировано, а потому чаще могли передать свой геном (уже включающий генетически управляемые алгоритмы научения) следующему поколению. Таким образом, естественный отбор благоприятствовал развитию способности к научению. Эволюционный алгоритм помог сделать важное открытие: возможность быстро менять определенные параметры тела, чтобы приспособиться к изменчивым условиям окружающей среды, будет только на пользу.

Естественно, некоторые аспекты физического мира неизменны: сила тяжести действует повсюду, а скорость распространения света и звука не меняется в одночасье. Именно поэтому нам не нужно учиться отращивать уши, глаза или внутренние лабиринты, которые в рамках вестибулярной системы отслеживают ускорение нашего тела: все эти свойства заложены в нас генетически. Другие параметры – расстояние между глазами, вес и длина конечностей, высота голоса и прочее – варьируются, а потому мозг вынужден приспосабливаться к ним. Как мы увидим далее, человеческий мозг есть результат компромисса. Наша долгая эволюционная история наделила нас, с одной стороны, множеством врожденных нейронных связей (кодирующих все общие интуитивные категории, на которые мы делим мир: образы, звуки, движения, объекты, животные, люди), а с другой стороны – неким сложным алгоритмом научения, позволяющим нам совершенствовать эти навыки на основе жизненного опыта.

Homo docens

Если бы меня попросили описать исключительные таланты нашего вида одним словом, я бы ответил: «Научение». Мы не просто *Homo sapiens*, мы *Homo docens*^[3] – вид, который учит себя сам. Большая часть наших знаний о мире не задана генами; мы извлекаем их из внешнего мира или получаем от тех, кто нас окружает. Ни одно другое животное не смогло столь радикально поменять свою экологическую нишу. Мы перебрались из африканской саванны в пустыни, горы, на острова и полярные ледники; мы жили в пещерах, строили города и даже побывали в космосе – и все это за несколько тысяч лет. Благодаря чему? Благодаря способности учиться. От освоения огня и изготовления каменных орудий до сельского хозяйства, научных изысканий и расщепления атома: история человечества – это история постоянного самообновления. В основе всех этих достижений лежит один секрет – экстраординарная способность нашего мозга формулировать гипотезы и выбирать те из них, которые лучше всего согласуются с внешним окружением.

Умение учиться – триумф нашего вида. Миллиарды параметров нашего мозга способны адаптироваться к нашей среде, нашему языку, нашей культуре, нашим обычаям и нашей пище. Эти параметры выбраны не случайно: в ходе эволюции дарвиновский алгоритм установил, какие пути необходимо задать предварительно, а какие должны окончательно сформироваться под влиянием внешнего мира. У нашего вида вклад научения особенно велик – хотя бы потому, что детство у человека длится гораздо дольше, чем у других млекопитающих. Поскольку мы обладаем уникальной способностью к речи и математике, наше учебное устройство легко ориентируется в обширных пространствах гипотез и их потенциально бесконечном множестве комбинаций, пусть даже все они уходят своими корнями в фиксированный и неизменный фундамент, унаследованный нами от предков.

Не так давно человечество обнаружило, что оно может еще больше развить эту замечательную способность с помощью одного института – школы. Педагогика – исключительная привилегия нашего вида: ни одно другое животное не занимается активным обучением своих детенышей, выделяя определенное время для наблюдения за их успехами, трудностями и ошибками^[4]. Изобретение школы – института, систематизирующего неформальное образование, существующее во всех человеческих обществах, – значительно увеличило потенциал нашего мозга. Мы убедились, что можем воспользоваться высочайшей пластичностью детского мозга и внедрить в него максимум информации и умений. На протяжении веков наша школьная система совершенствовалась, и сегодня она охватывает период от пятнадцати лет и более. Доступнее стало и высшее образование. Университеты – это подлинные нейроперерабатывающие заводы, в которых наш мозг обретает и оттачивает свои главные таланты.

Образование – основной акселератор мозга. Неудивительно, что оно занимает первые строчки в перечне государственных расходов: без него сети корковых нейронов остались бы алмазами неограниченными. Самой сложностью нашего общества мы обязаны тому положительному влиянию, которое образование оказывает на кору головного мозга: это чтение, письмо, арифметика, алгебра, музыка, чувство времени и пространства, улучшение памяти... Например, вы знали, что кратковременная память у грамотного человека, количество слогов, которое он может повторить, почти вдвое больше, чем у взрослого, который никогда не ходил в школу и остался неграмотным? А что IQ повышается на несколько единиц с каждым дополнительным годом обучения?

Научение научению

Образование приумножает и без того немалые возможности нашего мозга – но может ли он функционировать еще лучше? В школе и на работе мы постоянно задействуем алгоритмы научения, но делаем это интуитивно, не обращая внимания на то, как именно протекает данный процесс. Никто никогда не объяснял нам правила, согласно которым мозг запоминает и понимает или, наоборот, забывает и ошибается. Это печально, ибо сегодня человечество обладает весьма обширными научными знаниями по этому вопросу. На веб-сайте, созданном британским фондом *British Education Endowment Foundation (EEF)*³, перечислены наиболее эффективные педагогические вмешательства; одну из первых строк в этом рейтинге занимает обучение метакогнитивным процессам (метапознание – знание возможностей и ограничений собственного мозга). Умение учиться – пожалуй, самый важный фактор академической успеваемости.

К счастью, теперь мы многое знаем о том, как работает научение. Тридцать лет исследований на стыке компьютерных наук, нейробиологии и когнитивной психологии позволили нам более или менее прояснить алгоритмы, которые использует наш мозг, выявить задействованные сети нейронов, установить факторы, которые модулируют их производительность, а также разобраться, почему у людей они особенно эффективны. Все эти вопросы мы обсудим по очереди. Надеюсь, когда вы закроете эту книгу, вы будете гораздо лучше понимать, что именно происходит в вашей голове во время научения. На мой взгляд, крайне важно, чтобы каждый ребенок и каждый взрослый осознавал весь потенциал собственного мозга и, конечно же, его ограничения. Систематически препарировав наши ментальные алгоритмы и мозговые механизмы, современная когнитивистика придает новый смысл знаменитому сократовскому изречению «Познай самого себя». Сегодня речь идет уже не о простой интроспекции, но о понимании тонкой нейрональной механики, генерирующей наши мысли, и ее использовании в соответствии с нашими потребностями, целями и желаниями.

Новая наука о научении, безусловно, особенно актуальна для всех работников системы образования: прежде всего учителей и методистов. Я убежден: правильно преподавать, не обладая – будь то имплицитно или эксплицитно – ментальной моделью того, что происходит в умах учеников, невозможно. Какими интуитивными представлениями они наделены изначально? Какие шаги необходимо предпринять, чтобы двигаться вперед? Какие факторы могут помочь им развить свои навыки?

Хотя когнитивная нейробиология не располагает точными ответами на все вопросы, сегодня мы знаем, что все дети появляются на свет с одинаковой архитектурой мозга – мозга *Homo sapiens*, кардинально отличающегося от мозга других человекообразных обезьян. Разумеется, я не утверждаю, что мозг одного человека есть точная копия мозга другого: в силу причуд нашего генома и особенностей раннего развития нам присущи разные «таланты» и разная скорость научения. Но несмотря на эти – весьма незначительные – отличия, базовая схема одинакова у всех, равно как и организация алгоритмов научения. По этой причине существуют фундаментальные принципы, которым обязан следовать всякий хороший педагог. Так, все маленькие дети обладают общим набором абстрактных представлений в сферах языка, арифметики, логики и теории вероятностей, обеспечивающим фундамент для дальнейшего обучения. Кроме того, все учащиеся извлекают пользу из сосредоточенного внимания, активного вовлечения, обратной связи и ночной консолидации памяти. Эти факторы я называю «четырьмя столпами» научения: как мы убедимся, именно они лежат в основе универсального алгоритма научения, которым пользуются и взрослые, и дети.

Вместе с тем человеческому мозгу свойственны индивидуальные вариации. В крайних случаях они могут носить патологический характер. В настоящее время реальность таких нарушений развития, как дислексия, дискалькулия, диспраксия и расстройства внимания, уже не вызывает сомнений. К счастью, благодаря лучшему пониманию архитектуры, порождающей данные отклонения, мы обнаружили, что существуют простые стратегии их диагностики и компенсации. Посему одной из целей данной книги я вижу распространение этих научных знаний с тем, чтобы каждый учитель и каждый родитель мог выбрать оптимальную тактику обучения. Хотя дети сильно отличаются друг от друга по *содержанию* своих знаний, все они пользуются одними и теми же алгоритмами научения. Следовательно,

педагогические приемы, успешно внедряемые в работе со всеми детьми, будут эффективны и для детей с нарушениями обучаемости – только применять их следует с большим вниманием, терпением, систематичностью и толерантностью к ошибкам.

Последнее особенно важно: хотя обратная связь по ошибкам необходима, многие дети со временем не только теряют уверенность в себе, но и утрачивают всякое любопытство. Проблема в том, что их зачастую наказывают за ошибки, а не помогают исправиться. В школах по всему миру обратная связь синонимична наказанию и стигматизации (в одной из глав мы подробно поговорим о том, какую роль играют в этой путанице школьные отметки). Отрицательные эмоции снижают учебный потенциал мозга, в то время как безопасная среда, не вызывающая чувства страха, наоборот, содействует восстановлению нейропластичности. Любой прогресс в образовании возможен только в том случае, если мы одновременно учитываем и эмоциональные, и познавательные аспекты нашего мозга – в современной когнитивной нейронауке оба считаются ключевыми элементами успешного научения.

Человек и машина

Сегодня перед человеческим интеллектом встает новая проблема: с недавних пор мы больше не являемся единственными чемпионами по способности учиться. Во всех областях знаний алгоритмы машинного обучения бросают вызов уникальному статусу нашего вида. Благодаря им современные смартфоны умеют распознавать лица и голоса, транскрибировать речь, переводить с одного языка на другой, управлять различными устройствами и даже играть в шахматы или го намного лучше, чем мы. Машинное обучение превратилось в многомиллиардную индустрию, черпающую вдохновение из организации и функционирования нашей собственной нервной системы. Но как работают эти искусственные алгоритмы? Помогут ли их принципы понять, что такое научение? Способны ли они уже сейчас имитировать работу живого мозга или им еще предстоит пройти долгий путь?

Хотя последние достижения в области информационных технологий завораживают, их ограничения очевидны. Классические алгоритмы глубокого обучения копируют лишь малую часть функционирования нашего мозга. По моему убеждению, эта часть соответствует первым стадиям сенсорной обработки, первым двумстам или тремстам миллисекундам, в течение которых наш мозг работает бессознательно. Данный тип обработки никоим образом не следует считать поверхностным: за долю секунды человеческий мозг может распознать лицо или слово, поместить его в контекст, понять и даже интегрировать в небольшое предложение... Проблема в том, что это сугубо восходящий процесс, не предполагающий каких-либо серьезных размышлений. Только на последующих стадиях обработки информации – более медленных и сознательных – наш мозг задействует все свои способности к рассуждению, умозаключению и анализу. Как с точки зрения логики, так и с точки зрения гибкости живой мозг значительно превосходит все современные машины. Даже самые продвинутые компьютерные архитектуры и те уступают человеческому младенцу в способности создавать абстрактные модели мира.

Даже в пределах своей основной специализации – например, в области быстрого распознавания форм – существующие алгоритмы гораздо менее эффективны, чем наш мозг. Современные компьютеры требуют миллионов, если не миллиардов, обучающих попыток. В самом деле, машинное обучение стало чуть ли не синонимом больших данных: в отсутствие гигантских объемов информации алгоритмы практически не способны извлечь абстрактные знания, которые можно перенести на новые ситуации. Другими словами, они не используют данные оптимальным образом.

В этом состязании младенческий мозг одерживает победу без труда: чтобы выучить новое слово, малышам достаточно одного или двух повторений. Их мозг выжимает максимум из минимума данных – умение, которое по-прежнему ускользает от компьютеров. Нейрональные алгоритмы научения умудряются извлечь суть из малейшего наблюдения. Если ученые желают добиться такой же производительности в машинах, им следует черпать вдохновение из механизмов, которые интегрировала в наш мозг сама эволюция. Это может быть внимание, которое позволяет нам отбирать информацию и усиливать релевантные сигналы, или, например, сон – алгоритм, посредством которого наш мозг синтезирует усвоенное в течение дня. Новые машины с такими свойствами уже появились, и их производительность неуклонно растет – в ближайшем будущем они, безусловно, составят серьезную конкуренцию нашему мозгу.

Согласно одной из новых теорий, причина, по которой человеческий мозг до сих пор превосходит машины, заключается в том, что он действует, как ученый-статистик. Постоянно вычисляя вероятности, он оптимизирует свою способность к научению. Судя по всему, в процессе эволюции наш мозг приобрел сложные алгоритмы, которые непрерывно оценивают его знания и сопряженную с ними неуверенность (неопределенность). Такое систематическое внимание к вероятностям является в математическом смысле наилучшим способом в полной мере использовать каждую единицу информации⁴.

Недавние эксперименты подтверждают эту гипотезу. Даже младенцы понимают вероятности: по всей видимости, они с рождения встроены в их нейронные сети. Дети ведут себя как маленькие ученые: их мозг изобилует гипотезами, которые напоминают научные теории и проверяются на опыте. Способность оперировать вероятностями, по большей части

бессознательно, вписана в саму логику нашего научения. Она позволяет любому из нас постепенно отвергать ложные гипотезы и сохранять только те теории, которые согласуются с данными. В отличие от других видов животных люди используют это чувство вероятностей для построения научных теорий о внешнем мире. Только мы – представители *Homo sapiens* – систематически генерируем абстрактные символические мысли и регулярно оцениваем их правдоподобие на основе новых наблюдений.

Иновационные компьютерные алгоритмы, учитывающие этот новый подход к научению, называются «байесовскими» – в честь преподобного Томаса Байеса (1702–1761), который сформулировал отдельные элементы этой теории еще в XVIII веке. Я предполагаю, что байесовские алгоритмы произведут настоящую революцию в машинном обучении: уже сегодня они способны извлекать абстрактную информацию не хуже любого ученого.

Наше путешествие в современную науку о научении состоит из трех частей.

Первая часть под названием «Что такое научение?» начинается с определения того, что значит для человека или животного – и для любого алгоритма или машины – учиться новому. Идея проста: учиться – значит последовательно формировать как в искусственных, так и в естественных нейронных сетях внутреннюю модель внешнего мира. Гуляя по незнакомому городу, я составляю его мысленную карту – миниатюрную модель улиц и переулков. Точно так же ребенок, который учится кататься на велосипеде, формирует подсознательную симуляцию того, как движения ног, нажимающих на педали, и рук, поворачивающих руль, влияют на устойчивость велосипеда. Аналогичным образом компьютерный алгоритм, который учится распознавать лица, собирает шаблонные модели возможных форм глаз, носов, ртов и их комбинаций.

Но как мы создаем правильную ментальную модель? Как мы увидим далее, ум учащегося можно уподобить гигантской машине с миллионами регулируемых параметров; настройки этих параметров в совокупности и определяют то, чему мы научились (например, где скорее всего будут находиться улицы на нашей ментальной карте окрестностей).

В головном мозге параметры – это синапсы, связи между нейронами, сила которых варьируется; в большинстве современных компьютеров параметры – это регулируемые веса или вероятности, определяющие силу каждой приемлемой гипотезы. Таким образом, научение – как в мозге, так и в машинах – требует поиска оптимального сочетания параметров, которые вместе определяют ментальную модель во всех ее подробностях. В этом смысле научение – проблема поиска; чтобы лучше понять, как научение работает в человеческом мозге, необходимо изучить, как алгоритмы обучения работают в современных компьютерах.

Сравнивая компьютерные алгоритмы с алгоритмами мозга *in silico*^[5] и *in vivo*^[6], мы постепенно получим более четкое представление о том, что означает научение на уровне мозга. Конечно, математикам и специалистам в области вычислительных систем не удалось разработать алгоритмы обучения, столь же мощные, как человеческий мозг, – пока. Тем не менее они все больше склоняются к теории оптимального алгоритма обучения, который должна использовать любая система, если она стремится к максимальной эффективности. Согласно этой теории, лучший ученик действует, как ученый, рационально использующий вероятности и статистику. Возникает новая модель: модель мозга как статистика, при которой корковые области мозга обрабатывают данные о вероятностях событий. Данная теория подчеркивает четкое разделение труда между наследственностью и средой: гены создают обширные пространства априорных гипотез, из которых впоследствии среда *выбирает* те, которые наилучшим образом описывают внешний мир. Иными словами, набор гипотез задан генетически, но их отбор зависит от опыта.

Согласуется ли эта теория с тем, как на самом деле работает мозг? И как научение реализуется в биологических нейронных сетях? Какие изменения происходят в нашем мозге, когда мы приобретаем новую компетенцию? Во второй части книги, «Как учится наш мозг», мы обратимся к психологии и нейробиологии. Особое внимание будет уделено младенцам – подлинным и непревзойденным самообучающимся машинам. Согласно новейшим исследованиям, они действительно ведут себя как юные специалисты по статистике. Их поразительная интуиция в сферах языка, геометрии, чисел и статистики подтверждает: младенцы могут быть чем угодно, но только не «чистым листом», *tabula rasa*^[7]. При рождении детский мозг уже организован, он проецирует гипотезы на внешний мир с самого первого дня. Кроме того, дети обладают значительным запасом пластичности, которая

отражается в непрерывных изменениях синапсов. В пределах этой статистической машины наследственность и среда не противостоят друг другу – напротив, они действуют сообща. Результатом является структурированная, но пластичная система с уникальной способностью к самовосстановлению после травм и переориентации уже существующих нейронных сетей на овладение навыками, не предусмотренными эволюцией, – например, чтением или математикой.

В третьей части книги, «Четыре столпа научения», я подробно расскажу о некоторых хитростях, которые делают наш мозг самым эффективным самообучающимся устройством, известным на сегодняшний день. В значительной степени нашу способность к научению модулируют четыре основных механизма. Первый – это внимание, система нейронных сетей, которые отбирают, усиливают и передают сигналы, считающиеся нами релевантными, тем самым усиливая их воздействие в нашей памяти в сто раз. Второй столп – активное вовлечение: пассивный организм почти ничему не научится, ибо научение требует активного генерирования гипотез, мотивации и любопытства. Третий столп – обратная связь: всякий раз, когда реальность не совпадает с нашими ожиданиями, в нашем мозге распространяются сигналы ошибки. Они корректируют имеющиеся ментальные модели, исключают непригодные гипотезы и стабилизируют наиболее точные. Наконец, четвертый столп – это консолидация: периодически наш мозг компилирует (собирает воедино) то, что он усвоил, и переносит это в долговременную память, тем самым высвобождая нейронные ресурсы для дальнейшего научения. Важную роль в этом процессе консолидации играет повторение. Мозг активен даже во сне; во время сна он в ускоренном темпе воспроизводит свои прошлые состояния и перекодирует знания, приобретенные в течение дня.

Эти четыре столпа универсальны: младенцы, дети и взрослые всех возрастов используют их каждый раз, когда задействуют свою способность к научению. Вот почему все мы должны научиться владеть ими – именно так мы сможем научиться учиться. В заключении мы обсудим практические последствия этих научных открытий. Изменить наши подходы к научению и обучению в школе, дома или на работе вовсе не так сложно, как кажется. Простые рекомендации касательно игр, любознательности, социализации, концентрации и сна помогут еще больше развить то, что и так является величайшим талантом нашего мозга, – способность учиться.

Часть I

Что такое научение?

По сути, интеллект можно рассматривать как процесс преобразования неструктурированной информации в полезные и актуальные знания.

Демис Хассабис, исследователь искусственного интеллекта, основатель компании DeepMind (2017)

Что такое научение? Во многих языках это слово имеет тот же корень, что и латинский глагол *apprehendere* («схватывать»): *apprehending* в английском, *apprendre* во французском, *aprender* в испанском и португальском. И действительно, научиться – значит уловить некий фрагмент реальности и перенести его в мозг. В когнитивных науках принято считать, что научение состоит в формировании внутренней модели мира. В процессе научения первичные данные, которые улавливают наши органы чувств, превращаются в более или менее абстрактные идеи, пригодные для повторного использования в новом контексте, – малые модели реальности.

Ниже мы узнаем, что обо всем этом говорит когнитивистика и наука об искусственном интеллекте. Как возникают такие внутренние модели в мозге и машинах? Как меняется репрезентация (представление) информации, когда мы учимся? Что происходит на уровне, общем для любого организма – будь то человек, животное или компьютер? Обсудив различные инженерные хитрости, позволяющие машинам учиться, мы получим более четкое представление о той невероятной работе, которую проделывает мозг всякого ребенка, когда он учится видеть, говорить и писать. Как ни странно, детский мозг сохраняет преимущество: несмотря на все технические и научные достижения, современные алгоритмы машинного обучения копируют лишь малую часть способностей человеческого мозга. Разобравшись, где заканчивается машинное обучение и в чем мозг ребенка превосходит даже самый мощный компьютер, мы точно определим, что значит «научение».

Глава 1

Семь определений научения

Что значит «научение»? Мое первое и самое общее определение таково: научиться – значит сформировать внутреннюю модель внешнего мира.

Вы можете этого не осознавать, но ваш мозг хранит тысячи таких моделей. Образно говоря, они похожи на миниатюрные муляжи, более или менее точно повторяющие реальность. Например, у всех нас есть ментальная карта района и дома, в котором мы живем, – достаточно закрыть глаза и мысленно представить их в мельчайших подробностях. Разумеется, никто из нас не родился с этой картой – мы приобрели ее посредством научения.

Богатство и разнообразие наших ментальных моделей, по большей части бессознательных, поражает воображение. Так, у любого англоговорящего читателя имеется обширная ментальная модель английского языка; благодаря ей он понимает слова, которые сейчас читает, и может догадаться, что слово *plastovski* – не английское, слова *swoon* и *wistful* – точно английские, а слово *dragostan* – возможно^[8]. Помимо языковой модели, мозг содержит и несколько моделей тела, которые он постоянно использует для коррекции положения конечностей при движении и для поддержания равновесия. Другие ментальные модели кодируют наши знания о физических объектах и взаимодействии с ними: вы знаете, как держать ручку, писать или ездить на велосипеде. Третьи описывают близких нам людей: у каждого человека имеется огромный ментальный каталог его родственников и знакомых, в котором задокументированы их внешность, голоса, вкусы и причуды.

Эти ментальные модели способны генерировать гиперреалистичные симуляции окружающей нас вселенной. Вы замечали, что иногда ваш мозг устраивает самые настоящие виртуальные реалити-шоу, в которых вы ходите, танцуете, посещаете новые места, ведете интересные беседы или испытываете сильные эмоции? Конечно, я говорю о снах! Кажется невероятным, но все мысли, которые приходят к нам в сновидениях, есть не что иное, как продукт неконтролируемой работы внутренних моделей мира.

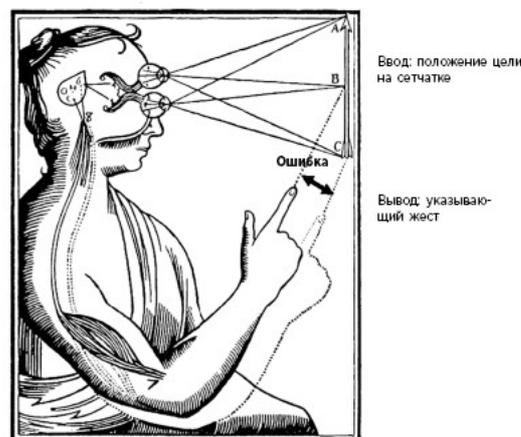
Впрочем, мы «изобретаем» реальность не только во сне: бодрствуя, наш мозг постоянно проецирует гипотезы и интерпретативные системы на внешний мир. Это происходит потому, что каждое изображение, попадающее на сетчатку глаза, неоднозначно. Например, всякий раз, когда мы видим тарелку, ее изображение подобно бесконечному количеству эллипсов. Почему же мы видим тарелку круглой, хотя органы чувств говорят нам, что она овальная? Все дело в дополнительных данных, которые поставляют наш мозг: он знает, что круглая форма – наиболее вероятная интерпретация. За кулисами сенсорные области непрерывно вычисляют вероятности, и в сознание попадает только наиболее вероятная модель. Именно проекции мозга в конечном счете придают смысл потоку данных, поступающему от органов чувств. В отсутствие внутренних моделей необработанные сенсорные данные остались бы бессмысленными.

В процессе научения наш мозг захватывает фрагмент реальности, который он ранее упустил, и использует его для построения новой модели мира. Такие модели могут отражать как внешнюю реальность, так и внутреннюю: первые формируются, когда мы изучаем историю, ботанику или карту города; вторые – когда мы учимся координировать движения во время игры на скрипке. В обоих случаях мозг *интернализирует* (т.е. *встраивает внутрь*) некий новый аспект реальности: фактически, чтобы усвоить неизвестный материал, он соответствующим образом перенастраивает свои нейронные сети.

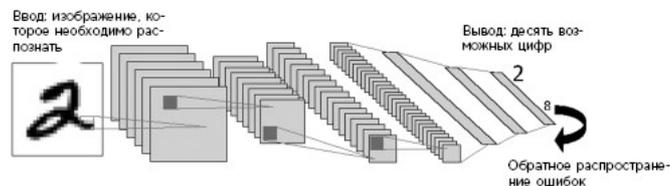
Такие изменения, безусловно, не совершаются наугад. Научение – это прежде всего способность приспосабливаться к внешнему миру и способность исправлять ошибки. Но откуда мозг «знает», как обновить внутреннюю модель, если, скажем, он заблудился и не может найти свой дом, упал с велосипеда, проиграл партию в шахматы или неправильно написал слово «экстаз»? Рассмотрим семь ключевых идей, которые лежат в основе современных алгоритмов машинного обучения и которые применимы и к человеческому мозгу, – семь различных определений того, что значит «научение».

Научение – это регулировка параметров ментальной модели

Иногда корректировка ментальной модели не представляет сложностей. Вообразите, что вы видите некий предмет и протягиваете к нему руку. Что происходит? Еще в XVII веке Рене Декарт (1596–1650) предположил, что наша нервная система должна содержать особые нейронные сети, преобразующие зрительные сигналы в мышечные команды (см. рисунок ниже). Вы можете убедиться в этом сами: попробуйте схватить предмет, надев очки другого человека, желательно близорукого. Еще лучше, если вам удастся раздобыть призматические очки, смещающие видимое изображение на дюжину градусов влево⁵. Естественно, первая попытка закончится провалом: из-за призм вы протянете руку не в сторону самого предмета, а гораздо правее. Путем последовательных проб и ошибок вы скорректируете свои движения и впредь будете брать левее. С каждым разом ваши движения будут все более и более точными – это ваш мозг учится компенсировать смещение. Но если снять очки и попробовать снова, вы с удивлением обнаружите, что ваша рука тянется не туда. Вы взяли слишком далеко в левую сторону!



Корректировка миллионов параметров: связи, обеспечивающие функцию зрения



Что такое научение? Учиться – значит корректировать параметры внутренней модели. Например, чтобы научиться указывать на предмет пальцем, необходимо устранить смещение видимого изображения: каждая ошибка несет в себе полезную информацию, позволяющую сократить разрыв. В искусственных нейронных сетях применяется та же логика, хотя число возможных регулировок значительно больше. Распознавание рукописного знака требует тонкой настройки миллионов связей. Опять же, каждая ошибка – в данном случае это неверный выходной сигнал «8» – может быть использована для корректировки параметров соединений, что позволяет улучшить производительность в следующем испытании.

Что же произошло? Всего за несколько минут ваш мозг скорректировал внутреннюю модель зрения. Параметр этой модели, отвечающий за несоответствие между видимым изображением и положением вашего тела, был установлен на новое значение. Во время процесса корректировки методом проб и ошибок ваш мозг делает то, что делает всякий охотник, регулирующий оптический прицел своего ружья: он совершает пробный выстрел и на основании результатов сдвигает видоискатель в нужном направлении. Данный тип научения протекает быстро: достаточно нескольких попыток, чтобы компенсировать смещение видимых объектов. Однако новые параметры несовместимы со старыми – отсюда систематическая ошибка, которая возникает всякий раз, когда мы снимаем призмы и возвращаемся к нормальному зрению.

Бесспорно, данный вид научения является весьма специфичным, поскольку требует корректировки только одного параметра (угла обзора). Обычно научение носит гораздо более сложный характер и предполагает регулировку десятков, сотен и даже тысяч миллионов параметров (каждого синапса в соответствующей сети нейронов). Тем не менее сам принцип остается неизменным: все сводится к поиску тех настроек внутренней модели, которые наилучшим образом отвечают состоянию внешнего мира.

Представим младенца, который недавно родился в Токио. В течение следующих двух-трех лет его внутренняя речевая модель должна будет адаптироваться к особенностям именно японского языка. Мозг этого малыша подобен машине с миллионами настроек на каждом уровне. Некоторые из этих настроек – например, на слуховом уровне – определяют, какой набор согласных и гласных используется в японском языке и какие правила позволяют их комбинировать. Ребенку, родившемуся в японской семье, предстоит узнать, какие фонемы составляют японские слова и где следует проводить границы между звуками. Один из параметров, в частности, касается различий между звуками [p] и [л]. Во многих языках между ними существует разительный контраст, но только не в японском: японцы не видят разницы между «ложей» и «рожей». Следовательно, каждый ребенок обязан отрегулировать целый набор параметров, которые в совокупности определяют, какие категории речевых звуков релевантны для его родного языка.

Похожая процедура научения повторяется на каждом уровне – от звуковых паттернов до лексики, грамматики и смыслового содержания. Мозг организован в виде иерархии моделей реальности, вложенных одна в другую наподобие матрешки. Учиться – значит использовать поступающие данные для корректировки параметров на каждом уровне этой иерархии. Рассмотрим пример высокого уровня: усвоение грамматических правил. Еще одна ключевая особенность японского языка заключается в порядке слов. В каноническом предложении с подлежащим, сказуемым и дополнением сначала идет подлежащее, затем сказуемое и, наконец, дополнение: «Джон + ест + яблоко». В японском языке, наоборот, сначала стоит подлежащее, затем дополнение – и только потом глагол: «Джон + яблоко + ест»^[9]. Примечательно, что тот же порядок характерен для предлогов (которые фактически становятся послелогом), притяжательных местоимений и многих других частей речи. Например, безобидная фраза «Мой дядя мечтает работать в Бостоне» превращается в изречение, достойное Йоды из «Звездных войн»: «Дядя мой Бостоне в работать мечтает».

Любопытно, но все эти инверсии имеют нечто общее. Лингвисты считают, что они обусловлены одним-единственным параметром – так называемой «позицией вершины». В английском, русском и других языках определяющее слово конструкции – ее вершина – обычно стоит на первом месте (в Париже, мой дядя, хочет жить), а в японском – на последнем (Париже в, дядя мой, жить хочет). Этот бинарный параметр отличает многие языки, даже те, которые не связаны исторически (язык навахо, например, подчиняется тем же правилам, что и японский). Таким образом, чтобы овладеть родным языком – скажем, английским или японским, – ребенок должен соответствующим образом настроить параметр «позиция вершины» в своей внутренней языковой модели («до» или «после»).

Научение – это использование комбинаторного взрыва

Неужели овладение речью действительно сводится к заданию каких-то там параметров? В это трудно поверить – но лишь потому, что мы не в состоянии представить то огромное поле возможностей, которое открывается перед нами с увеличением количества параметров, поддающихся регулировке. Это так называемый «комбинаторный взрыв» – экспоненциальный рост возможностей, возникающий при объединении даже небольшого их числа. Предположим, что грамматика мировых языков может быть описана примерно 50 бинарными параметрами, как это постулируют некоторые лингвисты. В итоге мы получаем 2^{50} комбинаций – более миллиона миллиардов возможных языков, или 1 с пятнадцатью нулями! Синтаксические правила трех тысяч реально существующих языков легко вписываются в это гигантское пространство. Однако наш мозг содержит не пятьдесят регулируемых параметров, а гораздо больше – восемьдесят шесть миллиардов нейронов, каждый из которых образует около десяти тысяч синаптических контактов, причем сила этих связей может варьироваться. Выходит, пространство ментальных представлений практически бесконечно.

Человеческие языки активно используют эти комбинации на всех уровнях. Рассмотрим, например, ментальный лексикон: набор слов, которые мы знаем и модель которых постоянно носим в своей голове. Так, любой англоговорящий взрослый свободно владеет примерно 50 тысячами слов с самыми разнообразными значениями^[10]. На первый взгляд это гигантский словарный запас, но человек умудряется приобрести его примерно за десять лет. Все потому, что мы можем разложить учебную задачу на составляющие. Учитывая, что эти пятьдесят тысяч слов в среднем состоят из двух слогов, каждый из которых состоит примерно из трех фонем, выбранных из сорока четырех фонем, существующих в английском языке, двоичное кодирование всех этих слов дает менее двух миллионов элементарных двоичных вариантов («битов» со значением 0 или 1). Другими словами, весь словарный запас взрослого человека уместился бы в небольшой 250-килобайтный компьютерный файл (каждый байт состоит из 8 битов).

Ментальный лексикон можно ужать еще сильнее, если принять во внимание большую избыточность языка. Любые шесть букв, выбранные наугад, например *xfdrga*, не всегда образуют английское слово. Настоящие слова состоят из слогов, объединенных согласно строгим правилам. Это верно на всех уровнях: предложения – это правильные сочетания слов, слова – это правильные сочетания слогов, а слоги – это правильные сочетания фонем. Комбинации эти многочисленны (человек выбирает из нескольких десятков или сотен элементов), но в конечном счете ограничены (допускаются только определенные комбинации). Фактически овладение языком – это обнаружение параметров, управляющих возможными комбинациями на всех уровнях.

Вкратце, человеческий мозг разбивает задачу научения на подзадачи, создавая иерархическую, многоуровневую модель. Особенно это очевидно в случае языка, включающего несколько уровней, или ярусов, – от элементарных звуков до целых предложений и даже полноценных бесед. Тот же принцип иерархической декомпозиции реализован во всех сенсорных системах. Некоторые участки мозга улавливают низкоуровневые паттерны: они видят мир сквозь крошечное пространственно-временное окно и анализируют мельчайшие закономерности. Например, в первичной зрительной коре каждый нейрон анализирует лишь очень небольшую область сетчатки. Он смотрит на мир через маленькое отверстие и, следовательно, обнаруживает только низкоуровневые закономерности – например, наличие движущейся наклонной линии. Миллионы нейронов выполняют одну и ту же работу в разных точках сетчатки; их выходы становятся входами следующего уровня, который обнаруживает «закономерности в закономерностях» и так далее. На каждом уровне область анализа расширяется: мозг ищет более масштабные закономерности как во времени, так и в пространстве. Именно эта иерархия позволяет нам обнаруживать сложные объекты или понятия: линию, палец, кисть, руку, человеческое тело... Нет, подождите, вообще-то тела два! Два человека стоят лицом друг к другу ижимают руки... Да это же первая встреча Трампа и Макрона!

Научение – это минимизация ошибок

Вычислительные алгоритмы, которые мы называем «искусственными нейронными сетями», построены по принципу иерархической организации коры головного мозга. Подобно коре, они содержат последовательные слои, каждый из которых пытается обнаружить более сложные закономерности, чем предыдущий. Поскольку эти слои организуют поступающие данные на все более и более глубоких уровнях, такие сети часто называют «глубокими» (или «глубинными»). Каждый слой сам по себе способен обнаружить лишь простейшие элементы внешней реальности (в таких случаях математики говорят о линейном разделении, то есть каждый нейрон может разделить имеющиеся данные только на две категории, А и Б, проведя через них прямую линию). Тем не менее, если собрать множество таких слоев, можно получить чрезвычайно мощное обучаемое устройство, способное обнаруживать сложные структуры и приспосабливаться к самым разнообразным задачам. Современные искусственные нейронные сети, использующие преимущества новейших компьютерных микросхем, относятся к глубоким в том смысле, что содержат десятки последовательных слоев. Чем дальше от входа находится слой, тем выше его «проницаемость» и способность идентифицировать абстрактные свойства.

Возьмем алгоритм *LeNet*, созданный французским пионером искусственных нейросетей Яном Лекуном (см. цветную иллюстрацию 2)⁶. Уже в 1990-х годах эта сеть добилась

замечательных результатов в распознавании рукописных знаков. Многие годы канадская почта использовала ее для автоматической обработки почтовых индексов. Как она работает? На входе алгоритм получает изображение символа в виде пикселей, а на выходе предлагает одну из возможных интерпретаций десяти цифр или двадцати шести букв. Искусственная сеть состоит из иерархии простых процессоров, которые немного напоминают нейроны и образуют последовательные слои. Первые слои подключены непосредственно к изображению: в них применяются простые фильтры, распознающие линии и фрагменты кривых. Процессоры высоких уровней содержат более мощные и сложные фильтры и могут научиться распознавать крупные части изображений: изгиб цифры 2, замкнутую петлю буквы O, параллельные линии буквы Z. Искусственные нейроны выходного слоя реагируют на символ независимо от его положения, шрифта или регистра. Все эти свойства не навязаны программистом: они вытекают из миллионов связей, которые соединяют процессоры. Эти связи, однажды отрегулированные автоматизированным алгоритмом, определяют фильтр, который каждый нейрон применяет к поступающим сигналам; именно эти настройки объясняют, почему один нейрон реагирует на цифру 2, а другой – на цифру 3.

Но как же настраиваются эти миллионы связей? Точно так же, как наш мозг, когда мы надеваем призматические очки! Всякий раз, когда сеть дает предварительный ответ, ей сообщают, правильный он или нет. Если ответ неправильный, сеть корректирует соответствующие параметры, дабы избежать ошибки в следующий раз. Каждый неправильный ответ несет в себе ценную информацию. Как и в случае с призматическими очками (слишком большое смещение вправо или влево), характер ошибки подсказывает системе, что именно нужно было сделать, чтобы решить задачу правильно. Вернувшись к источнику ошибки, машина определяет оптимальные параметры, которые впредь позволят ее избежать.

Вернемся к охотнику, которому нужно отрегулировать оптический прицел своего ружья. Процедура обучения элементарна. Охотник стреляет и обнаруживает, что взял на пять сантиметров правее. Теперь он располагает важной информацией как об амплитуде (пять сантиметров), так и о характере ошибки (смещение вправо). Эти сведения дают ему возможность скорректировать следующий выстрел. Если охотник умный, он быстро сообразит, как исправить ситуацию: если пуля отклонилась вправо, необходимо сдвинуть прицел чуть влево. А если он не настолько проницателен, он может выбрать другую мишень и проверить, что произойдет, если прицелиться правее. Таким образом, путем проб и ошибок охотник рано или поздно обнаружит, какие именно манипуляции с прицелом уменьшают отклонение пули от намеченной цели.

Меняя положение прицела, наш храбрый охотник применяет алгоритм научения, хотя сам этого не осознает. Он имплицитно вычисляет то, что математики называют «производной» системы, или ее градиентом, и использует «метод градиентного спуска». Иными словами, охотник учится смещать видоискатель ружья в направлении, уменьшающем вероятность ошибки.

Несмотря на миллионы входов, выходов и регулируемых параметров, большинство искусственных нейросетей, используемых в современном искусственном интеллекте, действуют точно так же, как наш охотник: они анализируют свои ошибки и на их основе корректируют свое внутреннее состояние в направлении, которое должно эти ошибки уменьшить. Во многих случаях такое обучение строго контролируется. Мы сообщаем сети, какой именно ответ она должна была выдать на выходе («Это 1, а не 7»), и точно знаем, в каком направлении необходимо корректировать параметры, если они привели к ошибке (математические вычисления позволяют определить, какие именно связи следует модифицировать, если в ответ на изображение цифры 1 сеть слишком часто дает на выходе 7). На языке машинного обучения это называется «обучением с учителем» (поскольку некто знает правильный ответ, который должна дать система) и «обратным распространением ошибки» (поскольку сигналы об ошибке отправляются обратно в сеть для изменения ее параметров). Процедура проста: я пробую ответить, мне сообщают правильный ответ, я определяю свою ошибку и корректирую параметры, чтобы впредь этой ошибки не совершать. На каждом этапе я делаю лишь небольшие поправки в нужном направлении. Вот почему такое обучение может протекать крайне медленно: в ходе овладения сложным видом деятельности вроде игры в *Tetris* данный цикл необходимо повторить тысячи, миллионы, даже миллиарды раз. Это и неудивительно: в пространстве с множеством регулируемых

параметров поиска оптимальных настроек для каждой гайки и болта могут занять некоторое время.

Данный принцип постепенной коррекции ошибки был реализован уже в самых первых искусственных нейросетях, созданных в 1980-х годах. Достижения в области вычислительной техники позволили распространить эту идею на гигантские нейронные сети, включающие сотни миллионов регулируемых соединений. Эти глубокие нейросети состоят из последовательностей этапов, каждый из которых адаптируется к текущей задаче. Например, на цветной иллюстрации 4 представлена система *GoogLeNet* на основе архитектуры *LeNet*. Последняя была предложена Яном Лекуном и выиграла один из самых престижных международных конкурсов по распознаванию образов. Анализируя миллиарды изображений, система научилась распределять их на тысячи различных категорий: лица, пейзажи, лодки, автомобили, собаки, насекомые, цветы, дорожные знаки и так далее. Каждый уровень ее иерархии настроен на некий важный аспект реальности: например, нейроны низших уровней избирательно реагируют на линии и текстуры. Чем выше уровень, тем больше нейронов учится реагировать на сложные признаки: геометрические фигуры (круги, кривые, звезды), части объектов (карман брюк, ручку автомобильной двери, пару глаз) и даже целые объекты (здания, лица, пауков)⁷.

Стараясь минимизировать ошибки, алгоритм градиентного спуска обнаружил, что эти формы лучше всего подходят для классификации образов. Однако, если бы та же самая сеть получала на входе отрывки из книг или нотные листы, она бы настроилась иначе и научилась распознавать буквы, ноты или любые другие фигуры, распространенные в новой среде. Например, на цветной иллюстрации 3 показано, как сеть такого типа самоорганизуется для распознавания тысяч рукописных цифр⁸. На самом низком уровне данные смешаны: одни изображения внешне похожи, но представляют собой разные цифры (скажем, 3 и 8); другие, наоборот, выглядят по-разному, но в действительности обозначают одно и то же (цифру 8, например, каждый пишет по-своему – у кого-то верхний контур замкнут, у кого-то не замкнут и т.д.). На каждом этапе степень абстракции возрастает, пока все варианты одного и того же знака не будут сгруппированы вместе. Посредством процедуры сокращения ошибок искусственная сеть обнаруживает иерархию признаков, наиболее важных для распознавания рукописных цифр. Примечательно, что само по себе исправление ошибок позволяет обнаружить целый ряд подсказок, облегчающих решение поставленной задачи.

Концепция обучения путем обратного распространения ошибки лежит в основе многих современных компьютерных приложений. Это рабочая лошадка, благодаря которой смартфон умеет распознавать ваш голос, а умный автомобиль – «видеть» пешеходов и дорожные знаки. Весьма вероятно, что наш мозг тоже использует ту или иную ее версию. Впрочем, метод обратного распространения ошибки может принимать разные формы. За последние тридцать лет в области искусственного интеллекта достигнут невероятный прогресс; исследователи обнаружили множество приемов, облегчающих обучение. Ниже мы рассмотрим их более подробно – оказывается, они многое могут рассказать о нас самих и о том, как мы учимся.

Научение – это исследование пространства возможностей

Одна из проблем, связанных с описанной выше процедурой коррекции ошибок, заключается в том, что система может заикнуться на неоптимальных параметрах. Представьте мяч для гольфа, который всегда катится под уклон. Допустим, прямо сейчас он движется по склону холма. Если в какой-то момент он попадет в ямку или в углубление, то уже никогда не достигнет его подножия – низшей точки ландшафта, абсолютного оптимума. Нечто подобное может случиться и с алгоритмом градиентного спуска, который иногда застревает в точке «локального минимума». «Локальный минимум» – своеобразный колодец в пространстве параметров, ловушка, из которой нельзя выбраться. Как только это происходит, обучение останавливается, ибо все последующие изменения кажутся контрпродуктивными: любое из них лишь увеличивает частоту ошибок. Система чувствует, что научилась всему, чему могла, и слепо игнорирует настройки высшего уровня, хотя те могут находиться всего в нескольких шагах в пространстве параметров. Алгоритм градиентного спуска не «видит» их, ибо отказывается подняться наверх, чтобы опуститься еще ниже. Близорукий, он отваживается отойти только на небольшое расстояние от начальной точки, а потому может не заметить лучшие, но удаленные конфигурации.

Это кажется вам слишком абстрактным? Представим конкретную ситуацию: вы идете за покупками на рынок, где хотите купить продукты подешевле. Вы минуете первого продавца (цены у него явно завышены), обходите второго (у него слишком дорого) и, наконец, останавливаетесь около третьего. У третьего продавца товар гораздо дешевле, чем у двух предыдущих. Но кто поручится, что в конце прохода или, возможно, в соседнем городе цены не окажутся еще ниже? Иначе говоря, понятия «лучшая местная цена» и «глобальный минимум» не всегда означают одно и то же.

На такой случай у специалистов в области вычислительной техники припасен целый арсенал хитроумных приемов. Большинство состоит в том, чтобы ввести в поиск лучших параметров элемент случайности. Идея проста: вместо того чтобы двигаться на рынке по одному-единственному проходу, разумнее выбрать более хаотичный маршрут; вместо того чтобы позволить мячу для гольфа спокойно катиться вниз по склону, следует придать ему ускорение, тем самым уменьшив вероятность того, что он застрянет в ямке. Иногда алгоритмы стохастического поиска пробуют удаленные и частично случайные настройки: если лучшее решение находится в пределах досягаемости, шансы рано или поздно найти его достаточно велики. На практике ввести некоторую степень случайности можно самыми разными способами: задавая или обновляя параметры хаотичным образом, внося разнообразие в порядок примеров, добавляя шум к данным или используя только случайный набор связей. Все это повышает надежность обучения.

Некоторые алгоритмы машинного обучения черпают вдохновение из дарвиновского алгоритма, который управляет эволюцией видов: в ходе оптимизации параметров они вводят мутации ранее обнаруженных решений. Как и в биологии, скорость этих мутаций должна тщательно контролироваться; это позволяет машине исследовать новые решения, не тратя слишком много времени на разного рода «авантюры».

В основе другого алгоритма лежит отжиг – один из видов термической обработки, которым издавна пользовались кузнецы и ремесленники для оптимизации свойств металла. Метод отжига позволяет получить исключительно прочный клинок и состоит в многократном нагревании сплава при постепенно понижающихся температурах. Это повышает вероятность того, что атомы займут правильное положение. Недавно суть этого процесса была успешно перенесена в информатику: алгоритм имитации отжига вносит случайные изменения в параметры при постепенном понижении виртуальной «температуры». Вероятность случайного события высока в начале, а затем начинает снижаться, пока система не достигает оптимальной конфигурации.

Ученые обнаружили, что все эти приемы чрезвычайно эффективны – а значит, не исключено, что в ходе эволюции некоторые из них были «встроены» в наш мозг. Случайный поиск, стохастическое любопытство и зашумленные нейроны – все это играет важную роль в научении у *Homo sapiens*. И в игре «камень, ножницы, бумага», и в джазовой импровизации, и в анализе возможных решений математической задачи случайность есть один из важнейших компонентов решения. Как мы увидим ниже, всякий раз, когда дети переходят в режим обучения – то есть когда они играют, – они исследуют десятки возможностей, причем зачастую делают это беспорядочно, наобум. Ночью их мозг продолжает жонглировать идеями, пока не наткнется на ту, которая лучше всего объясняет пережитое в течение дня. В третьей части этой книги мы еще вернемся к полуслучайному алгоритму, который отвечает за ненасытное любопытство детей – и тех счастливых взрослых, которым удалось сохранить ум ребенка.

Научение – это оптимизация функции вознаграждения

Помните систему *LeNet* Лекуна, которая распознает формы цифр? Чтобы этот тип искусственной нейросети мог учиться, его необходимо обеспечить правильными ответами. Иными словами, сеть должна знать, какой из десяти возможных цифр соответствует каждое введенное изображение. Для исправления ошибок система должна вычислить разницу между своим и правильным ответами. Данная процедура получила название «обучения с учителем»: некто вне системы знает решение и пытается научить машину. Метод достаточно эффективный, однако следует отметить, что ситуация, в которой правильный ответ известен заранее, – большая редкость. Когда дети учатся ходить, никто не говорит им, какие именно мышцы нужно сокращать; их просто поощряют пробовать снова и снова, пока они не перестают падать. Другими словами, малыши учатся исключительно на основе оценки результата: я упал или же мне удалось наконец пересечь комнату.

С той же проблемой «обучения без учителя» сталкивается и искусственный интеллект. Например, когда машина учится играть в видеоигру, перед ней ставят одну-единственную задачу – набрать максимальное количество очков. Никто не говорит ей, какие именно действия необходимо для этого предпринять. Как же быть? Как машине самостоятельно найти эффективный и быстрый способ достичь поставленной цели?

«Очень просто», – сказали ученые и придумали так называемое «обучение с подкреплением», в рамках которого мы не сообщаем системе никаких подробностей о том, что она должна делать (этого никто не знает!), но определяем «награду» – например, в виде количества очков⁹. Что еще хуже, машина может узнавать это количество с задержкой, уже после совершения тех или иных действий. Обучение на основе отложенного подкрепления – принцип, на базе которого *DeepMind*, дочерняя компания *Google*, построила машину, способную играть в шахматы, шашки и го. В конце партии система получает единственный сигнал, свидетельствующий о выигрыше или проигрыше. Во время самой игры обратная связь отсутствует – засчитывается лишь окончательная победа над соперником. Как же тогда машине определить, что нужно делать? И, если уж на то пошло, как она может оценить свои действия, если известен только исход игры?

Ученые нашли хитрое решение. Они программируют машину так, чтобы она делала сразу две вещи: действовала и одновременно оценивала собственный прогресс. Одна половина системы, так называемый «критик», учится предсказывать конечный результат. Цель этой сети искусственных нейронов заключается в том, чтобы как можно точнее оценить состояние игры и предсказать ее исход: я выигрываю или проигрываю? Благодаря «внутреннему критику» система способна оценивать свои действия в любой момент времени, а не только в конце. На основании этой оценки другая половина машины, «актор» (собственно, «исполнитель»), корректирует свое поведение: пожалуй, мне не стоит делать то-то и то-то – «критик» считает, что это увеличит мои шансы на проигрыш.

Испытание за испытанием «актор» и «критик» работают в тандеме: один учится выбирать наиболее эффективные действия, другой – как можно точнее оценивать их последствия. Спустя некоторое время – в отличие от того парня из анекдота, который падает с небоскреба и на лету восклицает: «Пока все хорошо!» – сеть «актор – критик» обретает невероятную прозорливость: способность предсказывать, какие партии скорее всего будут выиграны, а какие неизбежно закончатся катастрофой.

Комбинация «актор – критик» – одна из самых эффективных стратегий современного искусственного интеллекта. При поддержке иерархической нейронной сети она буквально творит чудеса. Еще в 1980-х годах эта система выиграла чемпионат мира по нардам, а недавно позволила *DeepMind* создать многофункциональную нейронную сеть, способную играть в разного рода видеоигры вроде *Super Mario* или *Tetris 10*. Достаточно задать пиксели изображения в качестве входных данных, возможные действия в качестве выходных данных и очки в качестве функции вознаграждения. Всему остальному машина научится сама. Играя в *Tetris*, она обнаружит, что на экране отображаются разные фигуры, что падающая фигура важнее остальных, что те или иные действия могут изменить ее ориентацию и положение в пространстве и так далее, – а затем выработает оптимальную тактику. В *Super Mario* изменения входных данных и вознаграждений учат машину обращать внимание на совершенно иные параметры: какие пиксели образуют тело Марио, как он движется, где находятся враги, как выглядят стены, двери, ловушки, бонусы... и как себя вести рядом с ними. Регулируя свои настройки – то есть миллионы связей, соединяющих слои, – сеть может адаптироваться ко всем типам игр и научиться распознавать формы *Tetris*, *Pac-Man* или *Sonic the Hedgehog*.

Но зачем учить машину играть в видеоигры? Два года спустя инженеры *DeepMind* использовали соответствующие наработки для решения жизненно важной экономической задачи: как *Google* оптимизировать управление своими компьютерными серверами? Искусственная нейронная сеть осталась прежней; изменились лишь входные данные (дата, время, погода, международные события, поисковые запросы, количество людей, подключенных к каждому серверу, и т.д.), выходные данные (подключение или отключение того или иного сервера на разных континентах) и функция вознаграждения (экономия энергии). Результат – мгновенное снижение энергопотребления. В итоге компания *Google* сократила расходы на электроэнергию на 40 процентов и сэкономила десятки миллионов долларов – а ведь оптимизировать эти самые серверы пытались сотни специалистов!

Искусственный интеллект, в самом деле, достиг таких высот, что способен перевернуть вверх дном целые отрасли.

Кстати, *DeepMind* совершала и другие подвиги. Как всем, наверное, известно, ее программе *AlphaGo* удалось победить Ли Седоля – восемнадцатикратного чемпиона мира по игре в го, до недавнего времени считавшейся Эверестом искусственного интеллекта¹¹. В го играют на огромной квадратной доске – гобане – размером 19x19 клеток (всего 361 клетка) черными и белыми камнями. Количество комбинаций настолько велико, что систематически проанализировать все будущие ходы, доступные каждому игроку, невозможно. И все же обучение с подкреплением позволило программе *AlphaGo* распознавать благоприятные и неблагоприятные комбинации лучше, чем любому живому игроку. Как ей это удалось? Разработчики, в частности, заставляли систему играть против самой себя, подобно тому как тренируется шахматист, одновременно играя и белыми, и черными. Идея проста: в конце каждой партии победившая программа усиливает свою тактику, а проигравшая ослабляет, при этом обе учатся более эффективно оценивать свои ходы.

Мы с удовольствием посмеиваемся над Мюнхгаузеном, который в своих легендарных «Приключениях» пытается вытащить себя из болота за волосы. В искусственном интеллекте, однако, безумный метод эксцентричного барона породил довольно сложную стратегию «самонастройки», или бутстрэппинга: шаг за шагом, начиная с бессмысленной архитектуры, лишенной всяких знаний, искусственная нейронная сеть становится чемпионом мира, просто играя сама с собой.

Ускорение обучения за счет обеспечения сотрудничества двух сетей – или, наоборот, их конкуренции – важный прорыв в области искусственного интеллекта, который до сих пор приносит щедрые плоды. Например, одна из последних идей, так называемое «согласительное обучение»¹², предполагает наличие двух противоборствующих систем: скажем, одна сеть учится распознавать картины Ван Гога, а вторая – их подделывать. Первая система получает бонус всякий раз, когда успешно идентифицирует подлинник, в то время как вторая – всякий раз, когда ей удается обмануть первую. Данный алгоритм обучения дает не один, а сразу два искусственных интеллекта: вездливого специалиста по Ван Гогу, обожающего выискивать мелкие детали, которые могут подтвердить подлинность картины, и гениального фальсификатора, чьи полотна способны ввести в заблуждение даже лучших экспертов. Такого рода обучение можно сравнить с подготовкой к президентским дебатам: многие кандидаты нанимают специальных людей, которые имитируют речь и повторяют лучшие реплики их оппонентов.

Можно ли применить такой подход к единому человеческому мозгу? Наши два полушария и многочисленные подкорковые ядра также содержат целую коллекцию экспертов, которые не только соперничают, но и сотрудничают, координируя и оценивая действия друг друга. Некоторые области нашего мозга учатся моделировать то, что делают другие; они позволяют нам «предвидеть» будущее и на удивление реалистично представить результаты наших поступков. Благодаря памяти и воображению мы легко можем увидеть море, в котором купались прошлым летом, или дверную ручку, за которую хватаемся в темноте. Некоторые области учатся критиковать: они постоянно оценивают наши способности и прогнозируют вознаграждение или наказание, которые мы можем получить. Именно эти участки подталкивают нас к действию или бездействию. Мы также увидим, что метапознание – способность к познанию самого себя, самооценке, мысленному моделированию того, что произойдет, поступи мы так или иначе, – играет фундаментальную роль в человеческом научении. Представления, которые мы формируем о себе, помогают нам добиваться успеха или в некоторых случаях вовлекают нас в замкнутый круг неудач. Таким образом, вполне уместно рассматривать мозг как совокупность сотрудничающих и конкурирующих экспертов.

Научение – это ограничение области поиска

Перед современным искусственным интеллектом по-прежнему стоит серьезная проблема: чем больше параметров имеет внутренняя модель, тем сложнее найти оптимальный способ ее настройки. Поскольку в современных искусственных нейросетях пространство поиска огромно, ученые вынуждены иметь дело с мощным комбинаторным взрывом: на каждом этапе доступны миллионы вариантов, а их комбинации настолько многочисленны, что исследовать их все просто невозможно. В результате обучение иногда протекает крайне медленно: требуются миллиарды попыток, чтобы заставить систему

выбрать верное направление в океане возможностей. Любые исходные данные – даже самые подробные – становятся скудными по сравнению с гигантскими размерами имеющегося пространства. Данная проблема получила название «проклятие размерности»; проще говоря, обучение – сложная штука, если у вас есть миллионы потенциальных рычагов, на которые можно давить.

Громадное количество параметров, которыми располагают искусственные нейронные сети, ведет ко второму препятствию – «переобучению», или «переподгонке»: у системы так много степеней свободы, что ей легче запомнить детали каждого примера, чем определить общее правило, которое их объясняет.

Как метко заметил основатель современных информационных технологий Джон фон Нейман (1903–1957), «с четырьмя параметрами я могу описать слона, а с пятью – заставить его махать хоботом». Ученый имел в виду, что наличие чересчур большого количества свободных параметров может обернуться во вред: слишком велика опасность «переподгонки» данных. Хотя машина запоминает каждую деталь, это не означает, что она «поняла» нечто важное. Вы можете составить описание пахидермов, не имея никаких глубоких познаний о слонах как о виде. Наличие слишком большого количества свободных параметров препятствует абстракции. Несмотря на то что система учится легко, она не способна выполнять обобщение, то есть применять полученные знания в новых ситуациях. Тем не менее способность к обобщению является ключом к любому обучению. Какой смысл в машине, способной распознать картинку, которую она уже видела, или выиграть партию в го, в которую она уже играла? Очевидно, что конечная цель заключается в том, чтобы распознать любое изображение или выиграть у любого игрока в любых обстоятельствах – как знакомых, так и незнакомых.

Разумеется, ученые уже придумали несколько решений этой проблемы. Одним из наиболее эффективных методов, которые могут как ускорить процесс обучения, так и улучшить способность к обобщению, является упрощение модели. Когда число параметров, подлежащих корректировке, сведено к минимуму, система вынуждена искать более общее решение. Именно эта идея подтолкнула Лекуна к изобретению *сверточных нейронных сетей* – искусственного обучаемого устройства, которое стало эталоном в области распознавания образов¹³. Идея проста: чтобы распознать элементы на картинке, достаточно проделать более или менее одинаковые действия везде. Например, на фотографиях лица могут оказаться в любом месте. Чтобы распознать их, необходимо применить один и тот же алгоритм к каждой части изображения (искать овал, пару глаз и так далее). Никакой необходимости в отдельных моделях для каждой точки сетчатки нет: то, что усвоено в одном месте, может быть повторно использовано в любом другом.

В процессе обучения сверточные нейронные сети Лекуна применяют все, что им удастся узнать в одной области, ко всей сети, на всех уровнях. Посему им предстоит усвоить гораздо меньшее количество параметров: по большому счету система должна отрегулировать один-единственный фильтр, который она будет применять везде, а не множество различных соединений для каждого фрагмента изображения. Этот простой трюк значительно улучшает производительность, особенно обобщение. Столкнувшись с новым изображением, алгоритм может использовать весь свой обширный опыт, полученный в результате анализа каждой точки каждой фотографии, которую он когда-либо видел. Это существенно ускоряет процесс обучения: машина исследует только подмножество моделей зрения. До начала обучения она уже знает о мире кое-что важное, а именно – что один и тот же объект может появиться в любом месте изображения.

Этот же прием работает и во многих других областях. Например, чтобы распознать речь, необходимо абстрагироваться от специфики голоса говорящего. Для этого искусственную нейронную сеть заставляют использовать одни и те же соединения в разных частотных диапазонах независимо от того, высокий голос или низкий. За счет уменьшения количества параметров, подлежащих корректировке, удастся не только увеличить скорость, но и улучшить способность к обобщению. Собственно, именно благодаря этому ваш смартфон может реагировать на ваш голос.

Научение – это проецирование априорных гипотез

Стратегия Яна Лекуна – хороший пример гораздо более общего явления: использования знаний, присущих системе изначально. Сверточные нейросети учатся лучше и быстрее других типов искусственных нейронных сетей, потому что они не учатся всему. В самой их

архитектуре заключена основополагающая гипотеза: то, что я узнаю в одном месте, можно обобщить и применить в других местах.

Главная проблема распознавания образов – это инвариантность: я должен распознать объект вне зависимости от его положения и размера, даже если он движется вправо или влево, ко мне или от меня. Это не только трудная задача, но и мощный ограничитель: логично предположить, что одни и те же подсказки помогут мне узнать лицо в любой точке пространства. Задействуя повсюду один и тот же алгоритм, сверточные сети эффективно используют это ограничение: они интегрируют его в саму свою структуру. Изначально, до любого обучения, система уже «знает» это ключевое свойство зрительного мира. Она не учится инвариантности, а принимает ее априори и использует для сужения учебного пространства – умно, не правда ли?

Мораль в том, что природу (наследственность) и среду не следует противопоставлять друг другу. Чистого научения в отсутствие каких-либо априорных ограничителей не существует. Любой алгоритм научения так или иначе содержит некий набор предположений об изучаемой области. Вместо того чтобы пытаться научиться всему «с нуля», гораздо эффективнее опираться на предварительные допущения, которые четко очерчивают базовые законы исследуемой области и интегрируют эти законы в саму архитектуру системы. Чем больше количество таких допущений, тем быстрее происходит научение (при условии, конечно, что эти допущения верны!). Это справедливо всегда. Например, было бы ошибочно полагать, что программа *AlphaGo Zero*, которая тренировалась играть в го сама с собой, возникла на пустом месте: ее первоначальное представление включало, среди прочего, знание топографии и симметрий игры, что позволило сократить пространство поиска в восемь раз.

Наш мозг тоже содержит множество допущений, причем самого разного толка. В одной из последующих глав мы убедимся, что при рождении мозг ребенка уже организован и весьма неплохо информирован. Дети имплицитно знают, что мир состоит из вещей, которые движутся, если их толкнуть, но никогда не проникают друг в друга (твердые предметы), а также из гораздо более странных сущностей, которые говорят и движутся сами по себе (люди). Специально изучать эти законы нет никакой необходимости: поскольку они верны везде, где живет человек, наш геном заранее встраивает их в мозг, тем самым существенно ускоряя процесс научения. Младенцам вовсе не приходится познавать мир «с нуля»: поскольку их мозг с самого начала изобилует врожденными ограничителями, все, что остается, – это усвоить определенные параметры, которые меняются непредсказуемо (форма лица, цвет глаз, тон голоса, индивидуальные вкусы окружающих людей и так далее).

С другой стороны, если мозг ребенка знает разницу между людьми и неодушевленными объектами, то это потому, что в определенном смысле он ей научился – не в первые дни своей жизни, но в ходе миллионов лет эволюции. Дарвиновский естественный отбор, по сути, представляет собой типичный алгоритм обучения – невероятно мощную программу, которая работала сотни миллионов лет на миллиардах обучающихся машин (под «машинами» я подразумеваю всех существ, когда-либо живших на Земле)¹⁴. Мы – наследники невероятной, бесконечной мудрости. Путем дарвиновских проб и ошибок наш геном впитал знания всех предшествующих поколений. Эти врожденные знания совсем иного типа, нежели конкретные факты, которые мы узнаем в течение жизни: они носят гораздо более абстрактный характер, ибо «программируют» наши нейронные сети уважать фундаментальные законы природы.

Вкратце, во время беременности наши гены закладывают архитектуру мозга, которая направляет и ускоряет последующее научение, ограничивая размер исследуемого пространства. На языке информатики можно сказать, что гены задают «гиперпараметры» мозга – высокоуровневые переменные, определяющие количество слоев, типы нейронов, общую форму их взаимосвязей, дублирование в сетчатке и так далее. Поскольку многие из этих переменных хранятся в нашем геноме, учиться им не нужно: наш вид усвоил их в ходе эволюционного развития.

Вывод: наш мозг – не просто пассивный приемник сенсорных импульсов. С самого начала он обладает набором абстрактных гипотез – знаниями, накопленными в результате дарвиновской эволюции и проецируемыми на внешний мир. Хотя не все ученые согласны с данной точкой зрения, я считаю ее ключевой: наивная эмпирическая философия, лежащая в основе многих современных искусственных нейросетей, ошибочна. Едва ли при рождении наши нейронные сети абсолютно дезорганизованы и лишены каких-либо знаний вообще.

Такого просто не может быть. Научение – и у человека, и у машины – всегда начинается с некоего набора априорных гипотез. Эти гипотезы система проецирует на поступающие данные, а затем выбирает те, которые лучше всего согласуются с текущими условиями. Как пишет Жан-Пьер Шанжё в своей книге *Neuronal Man* (букв. «Человек нейронный», 1985), «учиться – значит исключать».

Глава 2

Почему наш мозг учится лучше, чем существующие машины

Глядя на последние достижения в сфере искусственного интеллекта, можно подумать, будто мы наконец-то сообразили, как скопировать и даже превзойти человеческое научение и интеллект. Согласно некоторым самопровозглашенным пророкам, машины вот-вот поработят нас. Ничто не может быть дальше от истины. На самом деле, большинство когнитивистов, несмотря на значительный прогресс в области искусственных нейронных сетей, прекрасно понимают, что возможности этих машин крайне ограничены. По правде говоря, почти все искусственные нейронные сети осуществляют только те операции, которые наш мозг выполняет бессознательно, за несколько десятых долей секунды, – прежде всего это восприятие образа, его распознавание, классификация и установление значения¹⁵. Однако в отличие от машин наш мозг умеет не только это, он способен изучать образ сознательно, тщательно, шаг за шагом, в течение нескольких секунд. Он формулирует символические представления (репрезентации) и эксплицитные теории мира, которыми мы можем поделиться с окружающими с помощью речи.

Операции такого рода – медленные, разумные, символические – остаются исключительной привилегией нашего вида (пока). Современные алгоритмы машинного обучения их практически не воспроизводят. Несмотря на активные исследования в области машинного перевода и логики, искусственные нейронные сети часто обвиняют в том, что они пытаются изучить все на одном уровне, словно решение всех задач сводится к автоматической классификации. Для человека с молотком все похоже на гвоздь! Но наш мозг гораздо гибче. Получив информацию, он быстро расставляет приоритеты и по возможности выводит общие, логические, эксплицитные принципы.

Чего не хватает искусственному интеллекту?

Ответив на этот вопрос, мы сможем выявить уникальные характеристики человеческой способности к научению. Вот краткий и, вероятно, неполный список функций, которыми обладает даже младенец, но которые отсутствуют в большинстве современных искусственных систем.

Усвоение абстрактных понятий. Большинство искусственных нейросетей воспроизводит только самые первые стадии обработки информации – анализ изображения, который зрительные области нашего мозга осуществляют менее чем за пятую долю секунды. Алгоритмы глубокого обучения далеко не так глубоки, как утверждают некоторые. По словам Йошуа Бенжю, одного из изобретателей алгоритмов глубокого обучения, такие системы в основном схватывают поверхностные, статистические закономерности в данных, а не абстрактные понятия высокого уровня¹⁶. Например, чтобы распознать объект, алгоритмы глубокого обучения часто полагаются на те или иные очевидные особенности изображения – скажем, определенный цвет или форму. Измените эти детали – и производительность алгоритма резко упадет: современные сверточные нейронные сети не способны распознать, что составляет сущность объекта. Они не понимают, что стул остается стулом независимо от того, сколько у него ножек (четыре или только одна) или из чего он сделан (из стекла, металла или пластика). Тенденция обращать внимание на поверхностные признаки делает эти сети восприимчивыми к ошибкам. Написано множество статей о том, как обмануть нейронную сеть: возьмите банан, измените несколько пикселей или прицепите к нему определенную наклейку. Вуаля! – нейронная сеть подумает, что это тостер!

Разумеется, человек, которому показали изображение на долю секунды, иногда совершает те же промахи, что и машина, и может принять собаку за кошку¹⁷. Однако, если ему дать чуть больше времени, он тут же исправит ошибку. В отличие от компьютера мы обладаем способностью подвергнуть сомнению наши убеждения и переориентировать внимание на те аспекты образа, которые не согласуются с первым впечатлением. Этот второй анализ, сознательный и разумный, задействует наши общие способности к рассуждению и абстракции. Искусственные нейронные сети упускают из виду одну очень важную вещь: человеческое научение – это не просто настройка фильтра распознавания образов, это

построение абстрактной модели мира. Например, когда мы учимся читать, мы приобретаем абстрактное представление о каждой букве алфавита, которое позволяет не только распознавать ее во всех возможных вариантах, но и генерировать новые:

А А А А А А А А А А

Когнитивист Дуглас Хофштадтер однажды сказал, что распознать букву А – настоящая проблема для искусственного интеллекта! Данное язвительное замечание, несомненно, является сильным преувеличением, но доля истины в нем есть: даже в таком тривиальном контексте люди умело справляются с абстракциями. Этот наш дар лежит в основе одного забавного явления повседневной жизни капчи – коротенькой последовательности букв, которую просят распознать некоторые сайты, дабы убедиться, что вы человек, а не машина. Многие годы капчи успешно противостояли машинам. Но компьютерная наука развивается быстро: в 2017 году искусственной системе удалось распознать капчу почти на человеческом уровне¹⁸. Неудивительно, что этот алгоритм имитирует человеческий мозг сразу в нескольких отношениях. Совершая истинный *tour de force*^[11], он умудряется извлечь скелет каждой буквы, внутреннюю сущность буквы А, после чего использует все ресурсы статистического мышления, чтобы проверить, применима ли эта абстрактная идея к имеющемуся образу. И все же этот компьютерный алгоритм, каким бы сложным он ни был, работает только с капчами. Наш мозг применяет способность распознавать абстракции во всех аспектах повседневной жизни.

Эффективная обработка данных. Все согласятся с тем, что современные нейронные сети обучаются слишком медленно: им требуются тысячи, миллионы, даже миллиарды элементов данных, чтобы сформировать представление об определенной области. У нас даже есть экспериментальные доказательства этой медлительности. Например, чтобы научиться приемлемо играть на консоли *Atari*, нейронной сети, разработанной *DeepMind*, необходимо минимум 900 часов, а человеку – всего 2!¹⁹ Другой пример – овладение речью. По оценкам психолингвиста Эммануэля Дюпу, в большинстве французских семей дети слышат от 500 до 1000 часов речи в год; этого более чем достаточно для усвоения языка Декарта, даже с такими мудреностями, как *soixante douze* («семьдесят два») или *s'il vous plaît* («пожалуйста»). С другой стороны, в племени цимане, населяющем север боливийской Амазонки, дети слышат только 60 часов речи в год, но это отнюдь не мешает им отлично говорить на языке цимане. Для сравнения: лучшие современные компьютерные системы от *Apple*, *Baidu* и *Google* требуют в 20–1000 раз больше данных, чтобы достичь даже мизерной языковой компетенции. В плане научения эффективность человеческого мозга остается непревзойденной: машины способны поглощать огромное количество информации, зато мы способны обрабатывать ее более эффективно. Иными словами, из минимума данных люди умеют извлекать максимум.

Социальное научение. Человек – единственный вид, который добровольно делится информацией: мы многому учимся у других людей благодаря речи. Данная способность до сих пор остается вне досягаемости современных искусственных нейросетей. В искусственных моделях знания зашифрованы, рассеяны в значениях сотен миллионов синаптических весов. В этой скрытой, имплицитной форме их нельзя извлечь и избирательно передать другим. Мы, напротив, можем эксплицитно сообщить другим информацию самого высокого уровня – ту, которая достигает нашего сознания. Сознательное знание неразрывно связано с возможностью его вербального выражения: всякий раз, когда мы приходим к более или менее четкому пониманию некоего явления, ментальная формула находит отклик в нашем языке мышления, и мы можем сообщить о ней окружающим с помощью речи. Необычайная эффективность, с которой человек делится своими знаниями с другими, используя минимальное количество слов («Чтобы попасть на рынок, поверните направо, на маленькую улочку за церковью»), до сих пор беспрецедентна как для животного мира, так и для мира компьютеров.

Научение с одной попытки. Ярчайший пример такой эффективности – усвоение нового материала с первой попытки. Если я употреблю новый глагол, скажем, «курдючить»^[12], хотя бы один раз, вы тоже сможете его использовать. Конечно, некоторые искусственные нейросети могут запомнить мою фразу. Но что машины пока не умеют делать хорошо, так это интегрировать новую информацию в существующую сеть знаний – а человеческому мозгу это отлично удается. Вы не только запоминаете новый глагол «курдючить», но и мгновенно понимаете, как его спрягать и вставлять в другие предложения: *вы часто курдючите? я курдючил вчера, а они курдючат сегодня*. Когда я говорю: «Давайте покурдючим завтра» – вы не просто узнаете новое слово, вы вставляете его в обширную систему символов и правил. Например, «курдючить» – личный глагол II спряжения (*я курдючу, ты курдючишь, он курдючит* и т.д.). Научиться – значит успешно внедрить новые знания в существующую сеть.

Систематичность и язык мышления. Грамматические правила – лишь один из примеров необычайного таланта нашего мозга: способности обнаруживать общие законы, лежащие в основе конкретных случаев. Будь то математика, язык, наука или музыка, человеческий мозг ухитряется извлекать из них абстрактные принципы, систематические правила, которые он может вновь применить в самых разных контекстах. Возьмем, к примеру, арифметику: наша способность складывать два числа носит очень общий характер – как только мы научились этой процедуре на малых числах, мы без труда можем применить ее к произвольно большим числам. Но главное – мы умеем делать обобщающие выводы. Многие дети в возрасте пяти-шести лет обнаруживают, что за каждым числом n следует число $n + 1$ и что последовательность целых чисел, следовательно, бесконечна – наибольшего числа просто не существует. Лично я до сих пор с трепетом вспоминаю момент, когда я это осознал – на самом деле, это была моя первая математическая теорема. Какие необыкновенные способности к абстракции! Каким образом нашему мозгу, состоящему из конечного числа нейронов, удается концептуализировать бесконечность?

Современным искусственным нейросетям недоступен даже такой простой абстрактный закон, как «за каждым числом следует другое число». Абсолютные истины – не их конек. Систематичность²⁰, способность к обобщению на основе некоего символического правила, а не поверхностного сходства по-прежнему ускользает от большинства современных алгоритмов. Иронично, но так называемые алгоритмы глубокого обучения практически не приспособлены к глубокому анализу.

Наш мозг, напротив, превосходно умеет выводить формулы на своем собственном, ментальном языке. Например, он может выразить понятие бесконечного множества, ибо обладает внутренним языком, наделенным такими абстрактными функциями, как отрицание и квантификация (бесконечное = *не* конечное = за пределами *любого* числа). Американский философ Джерри Фодор (1935–2017) предложил теоретическое объяснение этой способности: он утверждал, что мы мыслим символами, которые комбинируются в соответствии с систематическими правилами особого «языка мышления»²¹. Возможности такого языка обусловлены его рекурсивной природой: каждый вновь созданный объект (скажем, понятие бесконечности) может быть немедленно использован в новых комбинациях, без ограничений. Сколько существует бесконечностей? Этот, казалось бы, абсурдный вопрос задал себе математик Георг Кантор (1845–1918) и сформулировал теорию трансфинитных чисел. Способность «бесконечно использовать конечный набор средств», согласно Вильгельму фон Гумбольдту (1767–1835), характеризует все человеческое мышление.

Некоторые искусственные модели пытаются имитировать усвоение абстрактных математических правил у детей, но для этого они должны овладеть совсем иной формой научения – той, которая опирается на уже существующий набор правил и базовых положений и предполагает быстрый выбор самых емких и правдоподобных из них²². С этой точки зрения научение становится похожим на программирование: оно состоит в выборе простейшей внутренней формулы среди всех доступных на языке мышления.

Современные нейронные сети по большей части не способны репрезентировать весь спектр абстрактных фраз, формул, правил и теорий, с помощью которых мозг *Homo sapiens* моделирует мир. Едва ли это случайно: в этом есть нечто сугубо человеческое, нечто такое, чего нет в мозге других видов животных и что современная нейробиология еще не успела изучить подробно – поистине уникальный признак нашего вида. По всей видимости, люди –

единственные приматы, чей мозг репрезентирует наборы символов, которые комбинируются в соответствии со сложным древовидным синтаксисом²³. В частности, сотрудники моей лаборатории доказали: услышав последовательность звуков – например, *bun-bun-bun-bun*, – человеческий мозг мгновенно строит теорию относительно лежащей в ее основе абстрактной структуры (три идентичных звука плюс один непохожий). Оказавшись в аналогичной ситуации, обезьяна обнаруживает последовательность из четырех звуков, понимает, что последний отличается, но, похоже, не интегрирует эти фрагментарные знания в единую формулу. Откуда нам это известно? Изучая мозговую деятельность обезьян, мы видим, как отдельные нейронные сети реагируют на количество и последовательности, но не наблюдаем интегрированного паттерна активности в области, отвечающей за речь у людей, так называемой зоне Брока²⁴.

По аналогии с этим потребуются десятки тысяч попыток, прежде чем обезьяна поймет, как изменить порядок последовательности (с АБВГ на ГВБА), хотя четырехлетнему ребенку достаточно пяти²⁵. Младенец, который родился всего несколько месяцев назад, уже кодирует внешний мир с помощью абстрактных и систематических правил – это способность, которой напрочь лишены не только классические искусственные нейросети, но и другие виды приматов.

Компоновка. Как только я научусь складывать два числа (к примеру), этот навык станет неотъемлемой частью моего репертуара талантов: иными словами, я немедленно смогу его применить для решения любых других задач. Я смогу использовать его как подпрограмму в десятках различных контекстов – скажем, чтобы оплатить счет в ресторане или проверить налоговую декларацию. Но главное – я смогу комбинировать его с другими приобретенными навыками: например, без труда взять некое число, прибавить к нему 2 и определить, что больше: новое число или 5²⁶.

Удивительно, но современные искусственные нейросети до сих пор не проявляют такой гибкости. Знание, которое они усвоили, остается изолированным в скрытых, недоступных связях, что препятствует его повторному использованию в других, более сложных задачах. В отличие от человека искусственные модели не умеют *сочетать* ранее приобретенные навыки, то есть рекомбинировать их для решения новых задач. Для современного искусственного интеллекта характерна чрезвычайно узкая специализация. Программа *AlphaGo*, которая может победить любого чемпиона по игре в го, – упрямый эксперт, неспособный обобщить свои таланты и применить их в другой, даже очень похожей игре (например, *AlphaGo* отлично умеет играть в го на стандартном гобане 19x19, но не на доске 15x15). В человеческом мозге, напротив, научение почти всегда означает преобразование знаний в эксплицитную форму, позволяющую их использовать повторно, рекомбинировать и объяснять другим. Здесь мы снова сталкиваемся с уникальным аспектом человеческого мозга, который тесно связан с речью и который, как оказалось, крайне трудно воспроизвести в машине. Еще в 1637 году эту проблему предвосхитил Декарт в своем фундаментальном труде «Рассуждения о методе»:

Но если бы сделать машины, которые имели бы сходство с нашим телом и подражали бы нашим действиям, насколько это мыслимо, то у нас все же было бы два верных средства узнать, что эта не настоящие люди. Во-первых, такая машина никогда не могла бы пользоваться словами или другими знаками, сочетая их так, как это делаем мы, чтобы сообщать другим свои мысли. Можно, конечно, представить себе, что машина сделана так, что произносит слова... Но никак нельзя себе представить, что она расположит слова различным образом, чтобы ответить на сказанное в ее присутствии, на что, однако, способны даже самые тупые люди. Во-вторых, хотя такая машина многое могла бы сделать так же хорошо и, возможно, лучше, чем мы, в другом она непременно оказалась бы несостоятельной, и обнаружилось бы, что она действует не сознательно, а лишь благодаря расположению своих органов. Ибо в то время как разум – универсальное орудие, могущее служить при самых разных обстоятельствах, органы машины нуждаются в особом расположении для каждого отдельного действия^[13].

Разум – универсальное орудие нашей психики. Умственные способности, перечисленные Декартом, предполагают наличие второй системы научения, иерархически занимающей более

высокое положение, чем первая, и основанной на правилах и символах. На ранних стадиях наша зрительная система отдаленно напоминает современные искусственные нейросети: она учится фильтровать поступающие образы и распознавать часто встречающиеся конфигурации. Этого достаточно, чтобы определить лицо, слово или расположение камней на гобане. Но затем стиль обработки информации кардинально меняется: научение становится больше сродни рассуждению, логическому выводу, имеющему своей целью выявить основополагающие правила изучаемой области. Создание машин, которым доступен этот второй уровень интеллекта, – сложнейшая задача. Но что конкретно делают люди, когда учатся на этом втором уровне, и что именно ускользает от большинства современных алгоритмов машинного обучения?

Учиться – значит логически выводить основы

Одной из характерных особенностей человека является неустанный поиск абстрактных правил, выводов высокого уровня, которые мы извлекаем из конкретной ситуации и впоследствии проверяем на новых наблюдениях. Попытки сформулировать такие абстрактные законы могут служить чрезвычайно мощной стратегией научения, поскольку самые абстрактные законы – это законы, которые применимы к наибольшему числу наблюдений. Поиск подходящего логического правила, учитывающего все доступные данные, – наиболее действенный способ существенно ускорить научение, и человеческий мозг умеет играть в эту игру очень хорошо.

Рассмотрим пример. Представьте, что я показываю вам десять непрозрачных ящиков с разноцветными шарами внутри. Я наугад выбираю ящик, из которого раньше ничего не доставал, запускаю в него руку и достаю зеленый шар. Можете ли вы сделать какие-нибудь выводы о содержимом ящика? Какого цвета будет следующий шар?

Вероятно, первый ответ, который придет вам на ум, прозвучит примерно так: *«Я понятия не имею – вы не дали мне практически никакой информации; откуда мне знать, какого цвета будет следующий шар?»* Да, но... Представьте, что некоторое время назад я вытащил несколько шаров из других ящиков, и вы отметили следующую закономерность: шары в каждом ящике всегда одного цвета. Выходит, все просто? Как только я покажу новый ящик, вам нужно всего-навсего увидеть один зеленый шар, чтобы сделать вывод, что все остальные шары тоже зеленые. Благодаря этому общему правилу научение происходит с одной попытки.

Данный пример наглядно иллюстрирует, как знания более высокого порядка, сформулированные на так называемом «метауровне», управляют наблюдениями более низкого уровня. Стоит нам усвоить некое абстрактное метаправило – например, «шары в каждом ящике одного цвета», – как процесс научения значительно ускоряется. Конечно, это правило может оказаться и ложным. Вы будете сильно удивлены (или «метаудивлены»), если в десятом ящике окажутся шары всех цветов. В этом случае вам придется пересмотреть свою ментальную модель и поставить под вопрос допущение о том, что все ящики одинаковые. Возможно, вы предложите гипотезу еще более высокого уровня, «метаметегипотезу». Скажем, что ящики бывают двух видов: в одних лежат шары одного цвета, в других – разных цветов. Если так, то вам потребуется по меньшей мере два шара из каждого ящика, чтобы сделать какие-либо выводы. В любом случае формулирование иерархии абстрактных правил существенно сократит драгоценное время научения.

В этом смысле научение предполагает управление внутренней иерархией правил и попытки как можно скорее вывести из них наиболее общие, подытоживающие целую серию наблюдений. Человеческий мозг, по-видимому, применяет этот иерархический принцип с детства. Возьмем двух- или трехлетнего ребенка, который гуляет в саду и узнает от родителей новое слово – допустим, слово «бабочка». Зачастую ребенку достаточно услышать слово один или два раза, и вуаля! – его значение зафиксировано в памяти. Невероятная скорость! Ни одна из известных на сегодняшний день систем искусственного интеллекта не способна учиться так быстро. Почему это так трудно? Потому что любой случай употребления слова не полностью ограничивает его значение. Обычно ребенок слышит слово «бабочка», находясь в окружении цветов, деревьев, игрушек и людей; все это – потенциальные значения нового слова, не говоря даже о менее очевидных значениях: каждое мгновение нашей жизни полно не только звуков, запахов, движений, действий, но и абстрактных свойств. «Бабочка» вполне может означать цвет, небо, движение или

симметрию. Существование абстрактных слов только усложняет задачу. Как дети узнают смысл слов «думать», «верить», «нет», «свобода» и «смерть», если то, что они обозначают, не поддается чувственному восприятию? Как они понимают, что значит «я», если каждый раз, когда они слышат это местоимение, говорящие имеют в виду... самих себя?!

Быстрое усвоение абстрактных слов так же несовместимо с наивными взглядами на формирование словарного запаса, как павловское обусловливание или скиннеровские ассоциации. Искусственным нейронным сетям, которые просто пытаются соотнести входные данные с выходными и образы со словами, обычно требуются тысячи попыток, прежде чем они начнут понимать, что слово «бабочка» относится к вон тому разноцветному насекомому в углу изображения. Разумеется, такое поверхностное соотнесение слов с картинками никогда не позволит установить смысл слов без фиксированного денотата, например, местоимения «мы», наречия «всегда» или существительного «запах».

Усвоение новых слов представляет огромную проблему для когнитивной науки. Тем не менее сегодня мы знаем, что часть решения кроется в способности ребенка формулировать нелингвистические, абстрактные, логические репрезентации. Еще до того, как малыши овладевают первыми словами, они активно пользуются своеобразным языком мышления, на котором могут формулировать и проверять абстрактные гипотезы. Их мозг – не «чистый лист»; врожденные знания, которые они проецируют на внешний мир, существенно ограничивают абстрактное пространство, в котором происходит научение. Более того, дети быстро схватывают значения новых слов потому, что в выборе подходящих гипотез руководствуются целым арсеналом правил высокого уровня. Такие метаправила значительно ускоряют процесс научения – точь-в-точь как в задаче с разноцветными шарами в разных ящиках.

Одно из правил, облегчающих усвоение лексики, заключается в том, чтобы всегда отдавать предпочтение простейшему предположению (наименьшему множеству), совместимому с данными. Например, когда ребенок слышит, как его мать говорит: «Посмотри на собаку», теоретически ничто не мешает слову «собака» относиться к *этой* конкретной собаке (Снупи) или, наоборот, к любому млекопитающему, четвероногому существу, животному или вообще всему живому. Как же ребенок узнает истинное значение слова – например, что слово «собака» применимо ко всем собакам, но только к собакам? Эксперименты показывают, что дети рассуждают логически: они проверяют все гипотезы, но оставляют только самую простую модель, которая согласуется с данными. Когда малыш слышит слово «Снупи», это всегда контекстуально связано с конкретным существом, а самое маленькое множество, совместимое с этими наблюдениями, ограничивается данной конкретной собакой. Впервые услышав слово «собака» в определенном контексте, многие дети полагают, что это слово относится только к конкретному животному, но, услышав его дважды, в двух разных контекстах, делают вывод, что слово относится ко всему виду. Согласно прогнозу математической модели, достаточно трех или четырех примеров, чтобы установить верное значение²⁷. Такие логические выводы дети делают быстрее, чем любая искусственная нейросеть, существующая на сегодняшний день.

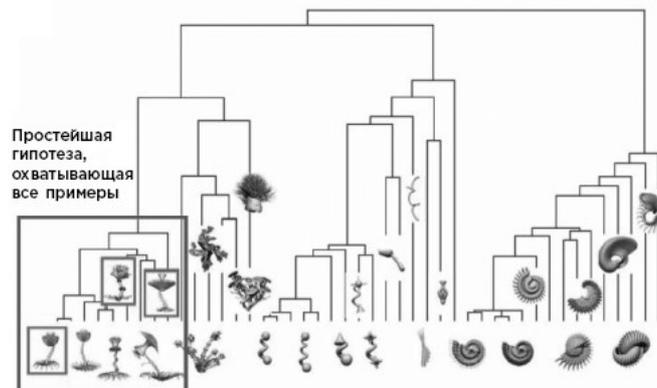
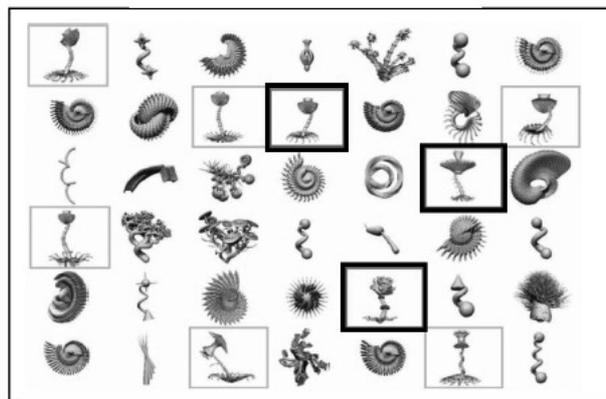
Овладеть речью в рекордные сроки (по сравнению с современными системами искусственного интеллекта) детям позволяют и другие хитрости. Одно из таких метаправил всем известно: обычно говорящий *смотрит* на то, о чем говорит. Это правило позволяет детям значительно ограничить абстрактное пространство, в котором они ищут значение нового слова: ребенку не нужно соотносить каждое незнакомое слово со всеми объектами в своем поле зрения, как поступил бы компьютер. Последний будет делать это до тех пор, пока не соберет достаточно данных и не убедится, что каждый раз, когда он слышит о бабочке, где-то есть маленькое разноцветное насекомое. Чтобы понять, о чем говорит мама, ребенку достаточно проследить за ее взглядом или направлением пальца. Это называется «совместным вниманием» и является фундаментальным принципом овладения речью.

Вот изящный эксперимент: покажите двух- или трехлетнему ребенку новую игрушку, посмотрите на нее и скажите: «Пупс!» Ребенок с первого раза поймет, что «пупс» – это название предмета. Теперь воспроизведите ситуацию, но на этот раз молчите – пусть слово «пупс» малыш услышит из динамика. В этом случае он ничему не научится, потому что не сможет расшифровать намерение говорящего²⁸. Маленькие дети усваивают значение нового слова только в том случае, если понимают намерение человека, который его произнес. Эта же способность позволяет им сформировать обширный запас абстрактных слов: чтобы понять, к какой мысли или слову апеллирует говорящий, они должны поставить себя на его место.

Дети используют множество метаправил для заучивания слов. Например, они опираются на грамматический контекст. Возьмем английский язык. Когда ребенку говорят: *Look at the butterfly* («Посмотри на эту бабочку»), наличие детерминатива *the* подсказывает ему, что следующее слово должно быть существительным. Это метаправило, несомненно, приобретено – дети явно не появляются на свет с врожденным знанием всех артиклей на всех языках. Тем не менее исследования показывают, что данный тип научения происходит очень быстро: к году младенцам уже известны самые распространенные детерминативы и другие служебные слова, облегчающие дальнейшее научение²⁹.

Это происходит потому, что некоторые грамматические слова употребляются очень часто и почти всегда стоят перед существительным. Может показаться, что подобные рассуждения создают замкнутый круг, но это не так. Примерно в шесть месяцев малыши начинают овладевать существительными: первыми в списке идут самые знакомые, например, *bottle* («бутылочка») и *chair* («стул»). Через некоторое время дети замечают, что этим словам часто предшествует другое слово – артикль *the*. Вывод: все эти слова, вероятно, принадлежат к одной категории (*существительным*) и обычно обозначают вещи. Руководствуясь данным метаправилом, ребенок, который услышал новое высказывание, например *the butterfly* («бабочка»), прежде всего ищет возможное значение среди окружающих его объектов, а не расценивает слово как глагол или прилагательное. Каждый последующий эпизод подкрепляет это правило, а оно, в свою очередь, облегчает и ускоряет последующее научение. Специалисты по психологии развития утверждают, что ребенок полагается на синтаксический бутстрэппинг: детский алгоритм овладения языком разворачивается постепенно, сам по себе, основываясь на последовательности небольших, но систематических шагов вывода.

Вот три туфы. Можете найти остальные?



Учиться – значит выбирать простейшую модель, которая согласуется с данными. Предположим, я покажу вам картинку, которая приведена выше, и скажу, что три объекта, обведенные в квадрат, – это «туфы». Располагая столь скудными данными, как вы найдете другие туфы? Ваш мозг вычисляет принципы, по которым были обведены именно эти изображения, строит иерархическое дерево их основных свойств, а затем выбирает самую маленькую ветвь, которая совместима со всеми данными.

Существует еще одно метаправило, которое дети часто используют для ускорения усвоения новых слов. Оно называется «допущением взаимного исключения» и вкратце может быть сформулировано следующим образом: одна вещь – одно название. Проще говоря, закон гласит, что два разных слова едва ли будут относиться к одному и тому же понятию – во всяком случае, это маловероятно. Следовательно, неизвестное слово скорее всего обозначает новый предмет или новую концепцию. Благодаря этому правилу ребенок, услышавший новое слово, может ограничить поиски его значения вещами, названия которых он пока не знает. Начиная с 16 месяцев дети мастерски пользуются этим трюком³⁰. Проведем эксперимент: возьмите две мисочки – пусть одна будет синяя, а другая, скажем, оливково-зеленая – и скажите ребенку: «Дай мне оливковую миску». Ребенок даст вам ту миску, которая не синяя (слово, которое он уже знает). Очевидно, он полагает, что если бы вы говорили о синей миске, то вы бы употребили слово «синяя» – значит, вы имеете в виду другую. Одноединственного раза достаточно, чтобы через несколько недель малыш вспомнил, что этот странный цвет называется «оливковый».

Здесь мы снова видим, что владение метаправилом значительно ускоряет процесс научения. Вполне вероятно, что само это метаправило тоже приобретено. И действительно, некоторые эксперименты показывают, что малыши из двуязычных семей применяют его гораздо реже, чем дети с одним родным языком³¹. Билингвальный опыт подсказывает им, что родители *могут* использовать разные слова, чтобы сказать одно и то же. Одноязычные дети, напротив, часто полагаются на правило исключительности. Со временем они приходят к выводу, что всякий раз, когда вы произносите новое слово, вы хотите познакомить их с новым предметом или концепцией. Услышав фразу «дай мне глакс» в комнате, полной знакомых предметов, ребенок будет повсюду искать эту таинственную штуку: ему и в голову не придет, что вы можете иметь в виду одну из уже известных ему вещей.

Все эти метаправила иллюстрируют так называемый «дар абстракции»: самые абстрактные метаправила усвоить легче всего – хотя бы потому, что их подтверждает каждое слово, которое слышит ребенок. Таким образом, грамматическое правило «перед существительным обычно идет артикль *the*» вполне может быть усвоено на ранней стадии и впоследствии облегчить приобретение обширного репертуара существительных. Благодаря абстракции примерно в два-три года дети вступают в благословенный период, по праву называемый «лексическим взрывом». В это время они без усилий выучивают от десяти до двадцати новых слов в день, полагаясь на подсказки, которые до сих пор ставят в тупик лучшие алгоритмы на планете.

Способность использовать метаправила, по-видимому, требует достаточно развитого интеллекта. Если так, значит, она присуща только человеку? Не совсем. В определенной степени делать абстрактные умозаключения способны и другие животные. Возьмем случай с Рико – бордер-колли, которого научили приносить самые разные предметы³². Все, что вам нужно, – это сказать: «Рико, принеси динозавра». Животное убегает в комнату с игрушками и через несколько секунд возвращается с плюшевым динозавром в пасти. Этологи, которые проверяли Рико, установили, что он знает около двухсот слов. Но это еще не самое удивительное. Оказывается, чтобы выучить новые слова, пес применял принцип взаимной исключительности! Если бы вы сказали: «Рико, принеси сикирид» (новое слово), он бы вернулся с предметом, названия которого не знал. Иными словами, Рико использовал метаправила, в том числе правило «одна вещь – одно название».

Математики и специалисты в области вычислительной техники уже приступили к разработке алгоритмов, которые позволят машинам усваивать подобную иерархию правил, метаправил и метаметаправил. В этих иерархических алгоритмах каждый эпизод обучения ограничивает не только параметры низкого уровня, но и знания самого высокого уровня, абстрактные гиперпараметры, которые, в свою очередь, управляют последующим обучением. Хотя таким системам еще далеко до экстраординарной эффективности, присущей человеческому мозгу при овладении речью, они показывают неплохие результаты. Например, на цветной иллюстрации 4 представлен новейший алгоритм, который, подобно искусственному ученому, ищет лучшую модель внешнего мира³³. Данная система обладает набором абстрактных примитивов, а также грамматикой, позволяющей генерировать бесконечное число структур более высокого уровня посредством рекомбинации этих элементарных правил. Например, она может определить линейную цепочку как последовательность тесно связанных точек, описываемую правилом «с каждой точкой

соседствуют две другие точки – одна слева, другая справа», и совершенно самостоятельно обнаружить, что такая цепочка является наилучшим способом представления множества целых чисел (от нуля до бесконечности) или политических взглядов (от ультралевых до ультраправых). Вариант той же грамматики дает двоичное дерево, где каждый узел имеет одного родителя и двух потомков. Такая древовидная структура выбирается автоматически, когда систему просят представить живые существа; машина, подобно искусственному Дарвину, заново открывает древо жизни!

Другие комбинации правил порождают плоскости, цилиндры и сферы, и алгоритм определяет, как такие структуры приближенно выражают географию нашей планеты. Более сложные версии того же алгоритма могут выразить еще более абстрактные идеи. Например, американские специалисты в сфере вычислительной техники Ной Гудман и Джош Тененбаум разработали систему, способную открыть принцип причинности³⁴, согласно которому одни события вызывают другие. Его формулировка носит весьма абстрактный и математический характер: «В направленном ациклическом графе, связывающем различные переменные, существует подмножество переменных, от которых зависят все остальные». Хотя это определение почти невозможно понять, оно прекрасно иллюстрирует тип абстрактных внутренних формул, которые эта ментальная грамматика способна выразить и проверить. Система тестирует тысячи таких формул, но сохраняет только те из них, которые согласуются с входящими данными. В результате она быстро выводит принцип причинности (если, конечно, некоторые из получаемых ею сенсорных сигналов являются причинами, а другие – следствиями). Это еще одно доказательство в пользу дара абстракции: принятие такой высокоуровневой гипотезы значительно ускоряет процесс обучения, ибо радикально сужает объем правдоподобных гипотез, среди которых осуществляется поиск. Вот почему из поколения в поколение дети неустанно спрашивают «почему?» и ищут объяснений, тем самым подпитывая бесконечную погоню нашего вида за научными знаниями.

Согласно данной точке зрения, научение состоит в анализе обширного набора утверждений, выраженных на языке мышления, и выборе того, которое наилучшим образом согласуется с данными. Как мы увидим далее, эта модель отлично описывает все, что происходит в мозге любого ребенка. Подобно начинающим ученым, дети формулируют теории и сравнивают их с внешним миром. Отсюда следует, что ментальные представления детей гораздо более структурированы, нежели представления современных искусственных нейросетей. С самого рождения мозг ребенка уже должен обладать двумя ключевыми составляющими: всеми механизмами, позволяющими генерировать множество абстрактных формул (комбинаторным языком мышления), и способностью выбирать из этих формул наиболее правдоподобные.

Таково наше новое видение мозга³⁵: мозг – это огромная генеративная модель, в значительной степени структурированная и способная формулировать бесчисленное множество гипотетических правил и структур, но постепенно ограничивающаяся теми, которые максимально точно описывают реальность.

Учиться – значит рассуждать как ученый

Как мозг выбирает наиболее подходящую гипотезу? По каким критериям он принимает или отвергает модель внешнего мира? Оказывается, для этого существует идеальная стратегия. Она лежит в основе одной из самых современных и продуктивных теорий научения – гипотезы о том, что мозг ведет себя как ученый. Согласно данной теории, учиться – значит рассуждать как хороший специалист по статистике, выбирающий из нескольких альтернативных теорий ту, у которой больше всего шансов оказаться верной. А какая теория вероятнее станет таковой? Разумеется, та, которая наилучшим образом объясняет имеющиеся данные.

Как же работает научное мышление? Когда ученые формулируют теорию, они не просто записывают математические формулы – они делают прогнозы. О силе теории судят по богатству исходных прогнозов, которые из нее вытекают. Последующее подтверждение или опровержение этих предсказаний ведет к подтверждению или крушению теории. Исследователи применяют простую логику: они формулируют несколько теорий, распутывают паутину вытекающих из них прогнозов и исключают теории, прогнозы которых опровергает опыт или наблюдения. Конечно, одного эксперимента редко бывает достаточно: зачастую, чтобы отделить истинное от ложного, приходится повторять эксперимент

несколько раз, в разных лабораториях. И все же, перефразируя философа науки Карла Поппера (1902–1994), невежество постепенно отступает, ибо благодаря серии догадок и опровержений мы можем шаг за шагом уточнить теорию.

В этом плане наука сродни человеческому научению. По мере того как мозг успешно формулирует все более и более точные теории внешнего мира на основе наблюдений, невежество каждого из нас постепенно отступает. Но разве это не просто туманная метафора? Нет. По сути, это довольно точное описание вычислений, которые, судя по всему, производит мозг. За последние тридцать лет гипотеза «ребенка как ученого» привела к ряду крупных открытий относительно того, как дети рассуждают и учатся.

Математики и ученые в области вычислительной техники уже давно сформулировали лучший способ рассуждения в условиях неопределенности. Эту теорию называют байесовской, в честь ее создателя, преподобного Томаса Байеса (1702–1761), английского пресвитерианского пастора и математика, ставшего членом Королевского общества. Возможно, правда, нам следовало бы назвать ее теорией Лапласа, поскольку именно Пьер-Симон, маркиз де Лаплас (1749–1827) – великий французский математик – придал ей окончательную форму. Как бы то ни было, несмотря на свой почтенный «возраст», в когнитивистике и машинном обучении она получила известность лишь в последние лет двадцать. К счастью, сегодня все больше исследователей осознают, что только байесовский подход, основанный на теории вероятностей, позволяет извлекать максимум информации из каждой единицы данных. Учиться – значит делать как можно больше выводов из каждого наблюдения, даже самого неопределенного. Правило Байеса это гарантирует.

Что же обнаружили Байес и Лаплас? В двух словах – как правильно делать выводы, то есть рассуждать на базе вероятностей с тем, чтобы проследить каждое наблюдение до его наиболее вероятной причины. Вернемся к основам логики. С древнейших времен человечество умело рассуждать на базе истинностных значений: *истинно* или *ложно*. Аристотель сформулировал правила дедукции, которые мы называем силлогизмами и применяем более или менее интуитивно. Например, правило под названием *modus tollens* (букв. «метод отрицания») гласит, что если *P* подразумевает *Q* и оказывается, что *Q* ложно, то и *P* тоже ложно. Именно это правило Шерлок Холмс применяет в знаменитом рассказе «Серебряный»^[14]:

Инспектор Грегори: Есть еще какие-то моменты, на которые вы советовали бы мне обратить внимание?

Холмс: На странное поведение собаки в ночь преступления.

Инспектор Грегори: Собаки? Но она никак себя не вела!

Холмс: Это-то и странно.

Шерлок рассудил, что *если* бы собака учуяла незнакомца, *то* непременно бы залаяла. Поскольку она этого не сделала, преступник, очевидно, не был посторонним человеком... Подобные рассуждения позволили знаменитому сыщику сузить круг подозреваемых и в конечном итоге разоблачить убийцу.

«Какое это имеет отношение к научению?» – наверняка спросите вы. Что ж, учиться – значит рассуждать как детектив: по сути, научение всегда сводится к анализу скрытых причин явлений и построению наиболее правдоподобной модели, которая ими управляет. Но в реальном мире наблюдения редко бывают истинными или ложными: они носят неопределенный и вероятностный характер. Вот тут-то в игру и вступают фундаментальные работы преподобного Байеса и маркиза де Лапласа: байесовская теория говорит нам, как мыслить вероятностями, то есть какие виды силлогизмов мы должны применять, когда данные не идеальные (истинные или ложные), а вероятностные.

Probability Theory: The Logic of Science («Теория вероятностей: Логика науки») – название увлекательной книги по байесовской теории, написанной статистиком Э.Т. Джейнсом (1922–1998)³⁶. Оказывается, то, что мы называем вероятностью, есть не что иное, как выражение нашей неуверенности. Теория с математической точностью описывает законы, по которым должна развиваться неуверенность с каждым новым наблюдением. Фактически это идеальное расширение логики в туманную область вероятностей и неопределенностей.

Рассмотрим пример, схожий по духу с тем, на котором преподобный Байес основал свою теорию в XVIII веке. Предположим, я вижу, как кто-то подбрасывает монетку. Если монетка правильная (симметричная), вероятность выпадения орла и решки одинаковая: пятьдесят на пятьдесят. Исходя из этой предпосылки, классическая теория вероятностей подсказывает нам, как вычислить вероятность того или иного исхода (например, вероятность выпадения пяти решек подряд). Байесовская теория позволяет двигаться в противоположном направлении – от наблюдений к причинам. Она дает нам возможность ответить на вопросы вроде «после того как я подброшу монету несколько раз, должен ли я изменить свои представления о ней?». По умолчанию предполагается, что монета симметрична. Но если решка выпадет двадцать раз подряд, я поступлю разумно, если пересмотрю свои изначальные допущения: с этой монетой явно что-то не так. Очевидно, моя первоначальная гипотеза стала неправдоподобной, но насколько? Как именно мне обновлять мои убеждения после каждого наблюдения? В рамках теории каждому допущению присваивается номер, соответствующий степени правдоподобия или уровню доверия. С каждым последующим наблюдением это число изменяется на величину, пропорциональную степени невероятности наблюдаемого исхода. Как и в науке, чем невероятнее экспериментальное наблюдение, тем сильнее оно нарушает прогнозы первоначальной теории и с тем большей уверенностью мы можем отвергнуть эту теорию и искать альтернативные интерпретации.

Байесовская теория невероятно эффективна. Во время Второй мировой войны британский математик Алан Тьюринг (1912–1954) использовал ее для расшифровки кода «Энигмы». Как известно, немецкие военные сообщения шифровались с помощью машины под названием «Энигма» – хитроумного устройства из шестеренок, роторов и электрических кабелей. После каждой буквы конфигурации, количество которых превышало один миллиард, менялись. Каждое утро шифровальщик задавал машине особые настройки, которые были запланированы на этот день. Затем он набирал текст, и «Энигма» выдавала на первый взгляд случайную последовательность букв, которую мог расшифровать только обладатель шифровального ключа. Всем остальным текст казался полностью лишенным какого-либо порядка. Однако гениальный Тьюринг обнаружил, что если две машины были настроены одним и тем же образом, то это приводило к небольшой погрешности в распределении букв, в результате чего возрастала вероятность того, что два сообщения будут похожи. Эта погрешность была настолько мала, что одной буквы было недостаточно, чтобы сделать какой-то точный вывод. Тем не менее, анализируя букву за буквой, Тьюринг смог доказать, что одна и та же конфигурация действительно использовалась дважды. С помощью устройства, которое называли «бомбой» (большой тикающей электромеханической машины, которая стала прототипом наших компьютеров), он и его команда регулярно взламывали код «Энигмы».

Но какое отношение это имеет к живому мозгу? Что ж, похоже, точно так же рассуждает и наша кора больших полушарий³⁷. Согласно этой теории, каждая область мозга формулирует одну или несколько гипотез и посылает соответствующие прогнозы в другие отделы. Таким образом, каждый модуль ограничивает предположения следующего, обмениваясь вероятностными предсказаниями о внешнем мире. Эти сигналы называются «нисходящими»: они зарождаются в областях высокого уровня – например, в лобных долях – и спускаются в сенсорные области более низкого уровня, такие как первичная зрительная кора. Теория предполагает, что эти сигналы выражают набор гипотез, которые наш мозг считает правдоподобными и хочет проверить.

В сенсорных областях нисходящие допущения вступают в контакт с «восходящей» информацией из внешнего мира – например, из сетчатки. Теория гласит: как только модель соприкасается с реальностью, мозг вычисляет сигнал ошибки – расхождение между тем, что предсказывала модель, и тем, что наблюдалось фактически. Байесовский алгоритм определяет, как использовать этот сигнал ошибки для изменения внутренней модели мира. Если ошибки нет, значит, модель правильная. В противном случае сигнал ошибки движется вверх по цепочке мозговых центров и по пути корректирует соответствующие параметры. В результате алгоритм относительно быстро приходит к ментальной модели, которая согласуется с внешним миром.

Согласно данному представлению о мозге, наши взрослые суждения объединяют два уровня: врожденные знания, присущие нам как виду (то, что сторонники байесовского подхода называют *априорной вероятностью* – наборы правдоподобных гипотез, унаследованных в ходе эволюции), и наш личный опыт (*апостериорная вероятность* – пересмотр этих гипотез на основе всех выводов, которые мы смогли сделать на протяжении

жизни). Такое разделение труда ставит точку в классической дискуссии об относительной роли наследственности и окружающей среды: организация нашего мозга обеспечивает нас как мощным стартовым снаряжением, так и не менее мощной самообучающейся машиной. Очевидно, все знания должны быть основаны на этих двух компонентах: во-первых, на наборе априорных допущений, предшествующих любому взаимодействию с окружающей средой, а во-вторых, на способности сортировать эти допущения в соответствии с их апостериорной правдоподобностью после соприкосновения с реальными данными.

На сегодняшний день мы можем математически доказать, что байесовский подход – это лучший способ учиться. Это единственный способ выделить саму суть учебного эпизода и извлечь из него максимум. Для научения достаточно всего нескольких битов информации вроде подозрительных совпадений, которые Тьюринг обнаружил в коде «Энигмы». Как только система их обработает, она получит достаточно данных, чтобы опровергнуть одни теории и подтвердить другие.

Значит, вот как работает мозг? Неужели он с рождения может генерировать массы гипотез, из которых затем выбирает те, которые наилучшим образом согласуются с наблюдаемыми данными? Получается, младенцы с самого рождения действуют как умные и терпеливые ученые-статистики? Способны ли они извлечь максимум информации из каждого учебного опыта? Давайте посмотрим, что удалось выяснить о мозге маленьких детей в ходе экспериментальных исследований.

Часть II

Как учится наш мозг

Споры об относительной роли наследственности и окружающей среды не утихали на протяжении тысячелетий. Подобны ли младенцы *tabula rasa* – чистому листу или пустому сосуду, которые должен заполнить опыт? Уже в 400 году до нашей эры в своем труде «Государство» Платон отверг представление о том, что наш мозг приходит в мир, будучи лишенным всякого знания. С самого рождения, утверждал он, каждая душа наделена двумя сложными механизмами: силой знания и органом, с помощью которого мы можем учиться.

Как мы уже убедились, две тысячи лет спустя прогресс в сфере машинного обучения заставил ученых прийти к аналогичному выводу. Обучение протекает значительно эффективнее, если машина обладает двумя свойствами: широким пространством гипотез (набором ментальных моделей с множеством возможных настроек) и сложными алгоритмами, которые корректируют эти настройки в соответствии с данными, полученными из внешнего мира. Как однажды сказал один из моих друзей, в дискуссии о роли наследственности и окружающей среды мы недооцениваем и первое, и второе! Чтобы учиться, необходимы две структуры: обширный набор потенциальных моделей и эффективный алгоритм для их адаптации к реальности.

Искусственные нейронные сети делают это по-своему, доверяя представление ментальных моделей миллионам регулируемых связей. Хотя такие системы способны на быстрое и бессознательное распознавание образов или речи, репрезентация более абстрактных гипотез, таких как правила грамматики или логика математических операций, им недоступна.

Человеческий мозг, по всей видимости, функционирует иначе: наши знания множатся за счет комбинирования символов. Согласно данной точке зрения, мы появляемся на свет с огромным количеством возможных комбинаций потенциальных мыслей. Этот язык мышления, включающий абстрактные допущения и грамматические правила, присутствует в нас изначально и порождает необъятное царство гипотез. Теория байесовского мозга гласит: чтобы эти гипотезы проверить, наш мозг должен действовать, как ученый: собирать статистические данные, а затем использовать их для выбора наиболее подходящей генеративной модели.

Такой взгляд на научение может показаться нелогичным. Он предполагает, что мозг каждого маленького ребенка потенциально содержит все языки мира, все объекты, все лица и все инструменты, с которыми он когда-либо сможет столкнуться, а также все слова, факты и события, которые он когда-либо сможет запомнить. Комбинаторика мозга такова, что все эти объекты мысли потенциально уже есть в нем – наряду с соответствующими априорными вероятностями, а также способностью обновлять их на основе текущего опыта. Неужели ребенок в самом деле учится именно так?

Глава 3

Невидимые знания младенцев

На первый взгляд не может быть никаких сомнений в том, что мозг новорожденного младенца начисто лишен всяких знаний. И правда: разве не разумно полагать, как это делал Джон Локк, что ум ребенка – «чистый лист», который приобретает свое содержание исключительно под влиянием окружающей среды? Похожую точку зрения высказывал и Жан-Жак Руссо (1712–1778) в своем трактате «Эмил, или О воспитании» (1762): «Мы рождаемся способными к учению, но ничего не понимающими, ничего не сознающими»^[15]. Почти два столетия спустя Алан Тьюринг, отец современной информатики, выдвинул следующую гипотезу: «Предположительно мозг ребенка – это нечто вроде блокнота, какие покупают в магазине канцелярских товаров: простой механизм, зато множество пустых листов».

Теперь мы знаем, что эта точка зрения в корне ошибочна. Внешность бывает обманчива: несмотря на свою незрелость, новорожденный мозг уже обладает значительными познаниями, унаследованными вследствие долгой эволюционной истории. По большей части, однако, эти знания остаются невидимыми, ибо никак не проявляются в примитивном поведении малышей. Ученым-когнитивистам потребовалась немалая изобретательность, чтобы продемонстрировать огромный репертуар способностей, с которыми рождаются все дети. Объекты, числа, вероятности, лица, речь... диапазон первоначальных знаний младенцев поистине широк.

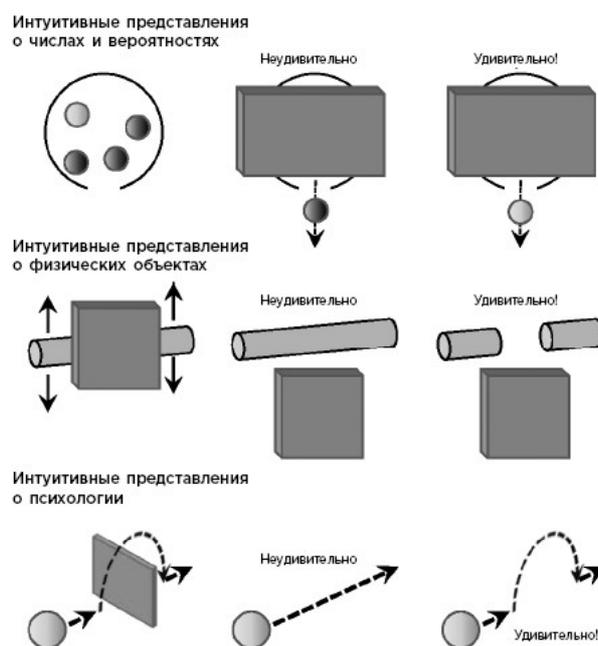
Понятие о физических объектах

На интуитивном уровне все мы знаем, что мир состоит из твердых объектов. На самом деле, он состоит из атомов, но на макроуровне, где живем мы, эти атомы часто объединяются в более крупные сущности, которые движутся как единое целое и иногда сталкиваются, не утрачивая при этом своей внутренней связности. Эти большие скопления атомов и есть то, что мы называем «объектами». Существование объектов является фундаментальным свойством окружающей среды. Должны ли мы этому специально учиться? Нет. Миллионы лет эволюции, похоже, запечатлели это знание в самых глубинах нашего мозга. Ребенок, родившийся всего несколько месяцев назад, уже знает, что мир состоит из объектов, которые движутся, занимают пространство, не исчезают без причины и не могут находиться в двух разных местах одновременно³⁸. В некотором смысле мозг младенца уже знает законы физики: он ожидает, что траектория движения объекта будет непрерывной как в пространстве, так и во времени, без каких-либо внезапных скачков или исчезновений.

Откуда нам это известно? Дело в том, что младенцы выказывают явное удивление в определенных экспериментальных ситуациях, нарушающих законы физики. В современных лабораториях исследователи превращаются в настоящих волшебников (см. цветную иллюстрацию 5). В маленьких театрах, специально созданных для малышей, они показывают всевозможные фокусы: предметы на сцене появляются, исчезают, множатся, проходят сквозь стены... Скрытые камеры зорко следят за движением глаз ребенка. Результаты не вызывают сомнений: к магии чувствительны даже те младенцы, которым едва исполнилось несколько недель. Эти крохи уже обладают глубокими интуитивными представлениями о физическом мире и, как и все мы, удивляются, когда их ожидания не оправдываются. Увеличив изображение глаз, ученые определяют, куда смотрят дети и как долго. После этого они могут точно измерить степень удивления и установить, что именно рассчитывали увидеть малыши.

Спрячьте какой-нибудь предмет за книгой, а затем внезапно «уроните» ее на стол, как будто скрытой вещи больше не существует (она упала в специальный люк): дети будут просто ошеломлены! Они не понимают, как твердый предмет мог буквально раствориться в воздухе. Их потрясению нет границ, когда предмет исчезает за одним экраном и вдруг появляется за другим или когда игрушечный поезд, катящийся вниз по склону, беспрепятственно проезжает сквозь стену. Кроме того, дети знают, что предмет – это нечто целое: увидев два конца палочки, которые синхронно движутся по обе стороны экрана, они, естественно, полагают, что за экраном скрывается одна палочка. Вообразите себе их удивление, когда экран опускается и они видят не одну, а две палочки (см. рисунок ниже).

Таким образом, можно утверждать, что младенцы с самого начала обладают обширными познаниями о мире, хотя и не знают всего. Конечно, нет. Обычно им требуется несколько месяцев, чтобы понять, как два объекта могут поддерживать друг друга³⁹. Поначалу они не знают, что если предмет уронить, то он упадет. Лишь очень постепенно дети осознают все факторы, которые заставляют объект падать или оставаться на месте. Прежде всего малыши обнаруживают, что предметы падают, когда теряют опору. Сперва они полагают, что любого контакта достаточно, чтобы игрушка оставалась неподвижной – например, можно положить ее на край стола, и никуда она оттуда не денется. Со временем они выясняют, что игрушка должна находиться не только в контакте со столом, но и *на* нем, а не *под* ним или *сбоку* от него. Наконец, спустя еще несколько месяцев дети понимают, что и этого правила недостаточно: главное, чтобы над столом оставался центр тяжести предмета – вот тогда игрушка точно не упадет!



Младенцы обладают чрезвычайно ранними интуитивными представлениями об арифметике, физике и даже психологии. В ходе экспериментов исследователи исходят из того, что на неожиданные события дети смотрят дольше, чем на ожидаемые. Например, малыши очень удивляются, когда из коробки с черными шарами вдруг выкатывается белый шар (интуитивные представления о числах и вероятностях) или когда за ширмой оказывается не одна палочка, а две (интуитивные представления о физических объектах). Увидев шар, который катится сам по себе, перепрыгивает через некое препятствие, а затем сворачивает вправо, дети делают вывод, что шар – живое существо с собственными целями и намерениями, а потому несказанно изумляются, если он продолжает прыгать даже тогда, когда никаких препятствий нет (интуитивные представления о психологии).

Вспомните об этом в следующий раз, когда ваш ребенок в десятый раз уронит ложку со стола: он просто экспериментирует! Как и всякому ученому, детям необходимо провести целую серию испытаний, чтобы последовательно отвергнуть все неправильные теории. Обычно это происходит в следующем порядке: (1) предметы висят в воздухе; (2) они не упадут, если коснутся другого предмета; (3) они не упадут, если будут лежать на другом предмете; (4) они не упадут, если большая их часть будет находиться выше другого предмета, и так далее и тому подобное.

Данный экспериментальный подход сохраняется и в зрелом возрасте. Мы все с интересом наблюдаем за предметами, которые, как нам кажется, нарушают обычные законы физики (гелиевые шары, мобили, неваляшки со смещенным центром тяжести), и смотрим волшебные представления, в которых кролики исчезают в шляпах, а женщин распиливают

пополам. Такие вещи развлекают нас, ибо не согласуются с интуитивными представлениями, которых наш мозг придерживался с рождения и которые активно совершенствовал в первый год жизни. Джош Тененбаум, профессор искусственного интеллекта и когнитивистики в Массачусетском технологическом институте, выдвинул любопытную гипотезу: по его мнению, мозг ребенка содержит своеобразный игровой движок, ментальную симуляцию типичного поведения объектов, подобную тем, которые используются в видеоиграх для моделирования виртуальной реальности. Задействуя эти симуляции в своей голове и сравнивая их с реальностью, младенцы быстро обнаруживают, что физически возможно или вероятно.

Чувство числа

Рассмотрим другой пример – арифметику. Разумеется, дети не понимают математику, это же очевидно! И все же, начиная с 1980-х годов, эксперименты свидетельствуют о прямо противоположном⁴⁰. В ходе одного из исследований младенцам показывают слайды с изображением двух предметов, среди которых изредка попадаются изображения с тремя предметами. Дети явно замечают это изменение, ибо смотрят на картинки с тремя предметами гораздо дольше, чем на картинки с двумя. Манипулируя характером, размером и плотностью предметов, ученые убедились, что младенцы действительно реагируют на само их количество, а не на какой-то иной физический параметр. Лучшим доказательством того, что младенцы обладают абстрактным «чувством числа», является способность к обобщению, а именно переходу от звуков к образам: если ребенок слышит «ту-ту-ту-ту» – то есть четыре звука, – он проявляет больший интерес к картинке с четырьмя предметами, чем к картинке с двенадцатью, и наоборот⁴¹. Контролируемые эксперименты такого рода весьма многочисленны; все они убедительно показывают, что дети с рождения обладают интуитивной способностью распознавать приблизительное число объектов, причем независимо от характера представления информации (зрительная или слуховая).

А считать малыши тоже умеют? Предположим, что дети видят, как за ширмой прячут сначала один предмет, а затем второй. Потом ширму опускают, и – о, чудо! – за ней оказывается только один предмет! Младенцы долго и внимательно смотрят за ширму, что свидетельствует о явном удивлении⁴². Если же за ширмой оказываются два предмета, продолжительность взгляда не превышает нескольких мгновений. Это «когнитивное удивление», возникающее при несовпадении реальности и умственных расчетов, показывает, что уже в возрасте нескольких месяцев дети понимают, что $1 + 1$ должно составлять 2. Они строят внутреннюю модель невидимой области и умеют ею манипулировать путем добавления или удаления объектов. Что примечательно, такие эксперименты работают не только для $1 + 1$ и $2 - 1$, но и для $5 + 5$ и $10 - 5$. При условии, что ошибка достаточно велика, девятимесячные дети удивляются всякий раз, когда фактическое количество предметов не совпадает с умственными расчетами: например, они точно знают, что $5 + 5$ не может быть 5, а $10 - 5$ не может быть 10⁴³.

Это действительно врожденный навык? Неужели первых месяцев жизни достаточно, чтобы ребенок усвоил основные законы, которые управляют поведением множества объектов? Хотя в течение первых месяцев точность, с которой дети оценивают количество⁴⁴, существенно улучшается, эксперименты показывают, что отправная точка – вовсе не «чистый лист». Новорожденные способны распознавать количество объектов уже через несколько часов после появления на свет – так же как обезьяны, голуби, вороны, цыплята, рыбы и даже саламандры. В случае с цыплятами исследователи контролировали все сенсорные входы: хотя птенцы не видели ни одного объекта в своей жизни, их «чувство числа» никуда не делось⁴⁵.

Такие эксперименты показывают, что арифметика – один из врожденных навыков, которым эволюция наделила не только человека, но и многие другие виды. Соответствующие нейронные сети были обнаружены у обезьян и воронов. Оказывается, их мозг содержит особые «числовые нейроны», которые «настроены» на определенное количество объектов. Одни клетки реагируют на один объект, другие – на два, три, пять или даже тридцать. Как ни странно, числовые нейроны присутствуют даже у тех животных, которые не получили никакого предварительного обучения⁴⁶. С помощью методов нейровизуализации сотрудники моей лаборатории установили: в гомологичных местах человеческого мозга тоже содержатся клетки, реагирующие на мощность множества (т.е. количество элементов конечного

множества). Недавно, благодаря новейшей аппаратуре, удалось непосредственно зафиксировать активность таких нейронов в гиппокампе⁴⁷.

Результаты этих исследований опровергают некоторые положения ведущей теории детского развития, сформулированной великим швейцарским психологом Жаном Пиаже (1896–1980). По мнению ученого, понятие «постоянства объектов» – понимание, что объекты продолжают существовать, даже если ребенок их больше не видит, – возникает ближе к концу первого года жизни. Что касается абстрактного понятия числа, Пиаже утверждал, что оно вообще недоступно маленьким детям и медленно формируется спустя несколько лет после рождения, главным образом за счет абстрагирования от более конкретных мер размера, длины и плотности. На самом деле, все как раз наоборот. Понятия объекта и числа являются фундаментальными характеристиками нашего мышления; они представляют собой часть «базовых знаний», с которыми мы приходим в мир, и в сочетании друг с другом позволяют формулировать более сложные мысли⁴⁸.

Чувство числа – лишь один из примеров того, что я называю невидимым знанием младенцев: интуитивных представлений, которыми они обладают с рождения и на которых строится последующее научение. Вот еще несколько навыков, которые исследователи обнаружили у малышей спустя несколько недель после рождения.

Интуитивные представления о вероятностях

От чисел до вероятностей всего один шаг. Ученые уже сделали его, решив выяснить, могут ли дети в возрасте нескольких месяцев предсказать исход лотереи. В ходе эксперимента младенцам сначала показывают прозрачный ящик, внутри которого хаотично перемещаются четыре шара – три красных и один зеленый. В самом низу ящика есть отверстие. В какой-то момент из него выкатывается либо зеленый шар, либо красный. Примечательно, что удивление ребенка напрямую связано с вероятностью происходящего. Если из ящика выпадает красный шар – наиболее вероятное событие, ибо большинство шаров красного цвета, – ребенок смотрит на него одно мгновение. Если же из ящика появляется зеленый шар – весьма неожиданный исход, с вероятностью один к четырем, – взгляд фиксируется на нем гораздо дольше.

Дальнейшие исследования подтверждают: в своих маленьких головках младенцы прогоняют детальную мысленную симуляцию ситуации и связанных с ней вероятностей. Если шары разделены некой перегородкой, перемещаются ближе или дальше от отверстия или выкатываются из ящика с разными интервалами, младенцы интегрируют все эти параметры в свои ментальные вычисления. Длительность их взгляда всегда отражает маловероятность наблюдаемого сценария, которую они, судя по всему, вычисляют исходя из количества задействованных предметов.

Все эти навыки превосходят возможности большинства современных искусственных нейросетей. И действительно, реакция удивления далеко не тривиальна. Удивление свидетельствует о том, что мозг сумел оценить шансы на тот или иной исход и пришел к выводу, что наблюдаемое событие крайне маловероятно. Поскольку во взгляде младенцев видны все признаки удивления, их мозг явно способен к вероятностным вычислениям. Кстати, одна из самых популярных современных теорий функционирования мозга рассматривает этот орган как вероятностный компьютер, который манипулирует распределениями вероятностей и использует их для предсказания будущих событий. Эксперименты показывают, что таким «продвинутым» калькулятором вооружены даже младенцы.

В ходе целой серии исследований было установлено: помимо калькулятора, мозг младенца снабжен всеми механизмами, позволяющими делать сложные вероятностные выводы. Помните математическую теорию вероятностей преподобного Байеса, благодаря которой можно проследить наблюдаемое явление до его вероятных причин? Похоже, дети способны применять правило Байеса уже через несколько месяцев после рождения⁴⁹. Они не только знают, как перейти от ящика с цветными шарами к соответствующим вероятностям (прямая цепочка умозаключений), как мы только что убедились, но и умеют переходить от наблюдений обратно к содержанию ящика (обратная цепочка умозаключений). В одном эксперименте малышам показывают непрозрачный ящик, после чего человек с завязанными глазами вынимает из него несколько шаров. Шары появляются один за другим; большинство

из них красного цвета. Могут ли младенцы сообразить, что в ящике лежит множество красных шаров? Да! В конце исследователи открывают ящик. Если оказывается, что большинство шаров зеленые, дети удивляются и смотрят в ящик дольше, чем в ящик, полный красных шаров. Их логика безупречна: если в ящике лежат в основном зеленые шары, как объяснить тот факт, что экспериментатор достал так много красных?

Хотя вам может показаться, что в этом поведении нет ничего особенного, оно подразумевает необычайную способность к имплицитным, бессознательным рассуждениям, работающим в обоих направлениях: на основании случайной выборки младенцы могут угадать характеристики множества, а на основании множества – характеристики случайной выборки.

Таким образом, с самого рождения наш мозг уже наделен интуитивной логикой. В настоящее время существует множество вариантов базовых экспериментов, описанных выше. Все они свидетельствуют об одном: дети ведут себя, как настоящие ученые, и рассуждают, как хорошие специалисты по статистике, исключая наименее вероятные гипотезы и выискивая скрытые причины различных явлений⁵⁰. В частности, американский психолог Фэй Сюй показала, что, если одиннадцатимесячные дети видят, как исследователь достает из контейнера преимущественно красные шары, а затем обнаруживают, что большинство шаров в ящике желтые, они не только удивляются, но и делают дополнительный вывод: этот человек предпочитает красные шары!⁵¹ Если же дети видят, что выборка не случайна, то есть следует определенному шаблону (скажем, желтый шар, красный шар, желтый шар, красный шар), они приходят к заключению, что ее произвел человек, а не машина⁵².

Логика и вероятность тесно связаны. Как говорил Шерлок Холмс, «мой старый принцип расследования состоит в том, чтобы исключить все явно невозможные предположения. Тогда то, что остается, является истиной, какой бы неправдоподобной она ни казалась»^[16]. Другими словами, мы можем превратить вероятность в уверенность, используя рассуждение для исключения некоторых возможностей. Если ребенок способен «жонглировать» вероятностями, значит, он владеет и логикой, ибо логическое мышление – всего лишь ограничение вероятностного рассуждения вероятностями 0 и 1⁵³. Недавно философ и психолог Люка Бонатти доказал это экспериментально. В его исследованиях десятимесячный ребенок видит, как за ширмой прячут два объекта: цветок и динозавра. Затем один из этих объектов достают, но какой именно – неизвестно: он лежит в горшке, так что видна только верхняя часть. После этого с другой стороны ширмы появляется динозавр. В этот момент ребенок может сделать логический вывод: «В горшке либо цветок, либо динозавр. Но это не может быть динозавр, потому что я только что видел, как он появился с другой стороны. Значит, в горшке цветок». И это работает: ребенок не удивляется, если исследователь достает из горшка цветок, но бурно реагирует, если там оказывается динозавр.

Кроме того, взгляд ребенка отражает интенсивность его логического мышления: как и у взрослого, его зрачки расширяются в тот момент, когда дедукция становится возможной. Малыш – настоящий Шерлок Холмс в пеленках – начинает с нескольких гипотез (это либо цветок, либо динозавр), а затем исключает некоторые из них (это точно не динозавр), тем самым переходя от вероятности к уверенности (это точно цветок).

«Теория вероятностей – язык науки», – говорит нам Джейнс, и младенцы уже знают этот язык: задолго до того, как они произносят первые слова, они манипулируют вероятностями и объединяют их в сложные силлогизмы. Их чувство вероятности позволяет им делать логические выводы из наблюдений. Они постоянно экспериментируют, а их мозг – как и мозг всякого ученого – непрерывно аккумулирует результаты этих экспериментов.

Знания о людях и животных

Маленькие дети обладают не только надежной моделью поведения неодушевленных предметов. Они знают, что на свете есть и другие объекты, которые ведут себя совершенно иначе: живые существа. С первого года жизни малыши понимают, что животные и люди автономны и способны двигаться без всякого постороннего вмешательства. Иными словами, чтобы переместиться в пространстве, им не нужно ждать, пока в них врежется другой объект. Их движение мотивировано изнутри, а не вызвано извне.

Как следствие, младенцы не удивляются, когда видят, что животные передвигаются сами по себе. Фактически малыши считают «животным» любой объект, который движется

самостоятельно, даже если он имеет форму треугольника или квадрата. Если так, в его поведении нет ничего необычного. Маленький ребенок знает, что живые существа не всегда движутся в соответствии с законами физики и что их перемещениями управляют их собственные намерения и убеждения.

Рассмотрим пример: если мы покажем детям шар, который катится по прямой, перепрыгивает через некое препятствие, а затем сворачивает вправо, через некоторое время им станет скучно. Может, они просто привыкают к такому движению? Нет. На самом деле, они понимают гораздо больше. Они приходят к выводу, что это живое существо с определенным намерением: оно хочет двигаться вправо! Более того, они уверены, что шар настроен крайне решительно: иначе он не стал бы перепрыгивать высокое препятствие. Теперь уберем препятствие. Если шар катится вправо по прямой, младенцы не находят в этом ничего странного – это самый быстрый способ достичь цели. Если же шар продолжает прыгать даже после того, как препятствие исчезло, малыши широко открывают глаза. В отсутствие препятствия та же траектория, что и в первом случае, вызывает искреннее удивление: дети не понимают, какими соображениями руководствуется этот чудной шар – зачем он прыгает?⁵⁴ Другие эксперименты показывают, что дети регулярно анализируют намерения и предпочтения других людей. В частности, они понимают, что чем выше стена, тем выше должна быть мотивация человека, который ее перепрыгивает. Из своих наблюдений малыши могут сделать вывод не только о целях и намерениях окружающих, но и об их убеждениях, способностях и предпочтениях⁵⁵.

Представления младенцев о живых существах этим не ограничиваются. К десяти месяцам дети начинают приписывать людям черты личности. Увидев, как кто-то толкает малыша, они делают вывод, что этот человек злой, и отворачиваются от него, явно предпочитая ему взрослого или другого ребенка, который помогает упавшему подняться⁵⁶. Задолго до того, как дети научаются произносить слова «плохой» и «хороший», они формулируют эти понятия на внутреннем языке мышления. Подобные суждения требуют тонкого анализа: даже девятимесячный ребенок может отличить того, кто намеренно обидел другого человека, от того, кто причинил боль случайно, или того, кто сознательно отказывается помочь ближнему, от того, кто просто не может это сделать⁵⁷. Как мы увидим далее, данный социальный навык играет фундаментальную роль в научении. И действительно, даже годовалый ребенок понимает, когда кто-то пытается его чему-то научить. Иными словами, он может отличить обычное действие от действия с целью обучить чему-то новому. В этом отношении годовалый ребенок уже обладает, согласно венгерскому психологу Дьердю Гергели, врожденным чувством педагогики.

Восприятие лиц

Одной из самых ранних манифестаций социальных навыков младенцев является восприятие лиц. Взрослым достаточно малейшего сходства, чтобы увидеть лицо. Мы видим лица в шаржах, смайликах, масках... Некоторые даже умудряются различить лик Иисуса Христа на снегу и подгоревших гренках! Как ни странно, эта сверхчувствительность к лицам присутствует уже при рождении: ребенок, родившийся всего несколько часов назад, быстрее поворачивает голову к улыбающемуся лицу, чем к аналогичному изображению, перевернутому вверх ногами (даже если новорожденный никогда не видел лиц). Одна команда исследователей пошла еще дальше и изучила реакцию плода на световые паттерны, предъявляемые через стенки матки⁵⁸^[17]. Удивительно, но эксперименты показали, что три точки, расположенные в форме лица (***) , привлекали плод больше, чем три точки, расположенные в форме пирамиды (***) . Очевидно, распознавание лиц начинается еще в утробе матери!

Многие исследователи полагают, что это магнетическое притяжение к лицам играет важную роль в раннем развитии привязанности – особенно если учесть, что одним из самых первых симптомов аутизма является избегание зрительного контакта. Благодаря врожденной склонности обращать внимание на лица мы быстро учимся их распознавать. И действительно, уже через пару месяцев после рождения область зрительной коры правого полушария начинает реагировать на лица активнее, чем на другие образы, например места⁵⁹. Такая специализация – один из лучших примеров гармоничного сотрудничества наследственности и среды. В сфере распознавания лиц младенцы проявляют не только врожденные навыки (магнетическое притяжение к изображениям, похожим на лица), но и

инстинктивное стремление овладеть спецификой восприятия лица. Именно сочетание этих двух факторов и позволяет младенцам уже через год выйти за рамки наивной реакции на наличие двух глаз и рта и впредь предпочитать человеческие лица лицам других приматов, таких как обезьяны и шимпанзе⁶⁰.

Языковой инстинкт

Социальные навыки маленьких детей проявляются не только в области зрения, но и в области слуха: устная речь дается им так же легко, как и восприятие лиц. Как пишет Стивен Пинкер в своем бестселлере «Язык как инстинкт» (1994), «речь настолько прочно встроена в человеческий мозг, что подавить стремление говорить так же невозможно, как подавить инстинкт отдергивать руку от раскаленных поверхностей»^[18]. Это утверждение не следует понимать превратно: хотя младенцы, разумеется, не рождаются с полноценным лексиконом и знаниями правил грамматики, они обладают удивительной способностью приобретать их в рекордно короткие сроки. В их мозге заложен не столько сам язык, сколько способность овладеть им.

На сегодняшний день найдено множество фактов, подтверждающих эту идею. С самого рождения младенцы предпочитают слушать родной язык, а не иностранный⁶¹ – поистине удивительное открытие, свидетельствующее о том, что овладение речью начинается еще в утробе матери. К третьему триместру беременности плод уже способен слышать. Проникая сквозь стенки матки, мелодика языка достигает младенца, и он запоминает ее. «Ибо когда голос приветствия Твоего дошел до слуха моего, взыграл младенец радостно во чреве моем», – воскликнула беременная Елизавета, когда ее посетила Мария⁶². Лука не ошибся: в последние месяцы беременности мозг растущего плода уже распознает определенные слуховые паттерны и мелодии (вероятно, бессознательно)⁶³.

Эту врожденную способность, несомненно, гораздо легче изучать у недоношенных детей, чем у плода. Как только они рождаются, мы можем подсоединить к их крошечным головкам миниатюрные электроды и датчики мозгового кровотока и заглянуть в их мозг. С помощью этого метода моя жена, профессор Гилен Деан-Ламбертц, обнаружила, что даже младенцы, родившиеся за два с половиной месяца до срока, реагируют на устную речь: хотя их мозг еще совсем незрелый, он уже способен распознавать изменения в слогах и голосах⁶⁴.

Долгое время считалось, что овладение речью начинается не раньше одного-двух лет. Почему? Потому что – как предполагает латинское слово *infans* – новорожденный ребенок не говорит и, следовательно, скрывает свои таланты. И все же, с точки зрения понимания языка, мозг ребенка – подлинный статистический гений. Чтобы это доказать, ученым пришлось применить целый арсенал хитроумных методов, включая анализ предпочтений речевых и неречевых стимулов, реакций на изменения, записей мозговых сигналов и так далее. Все эти исследования свидетельствуют о том, что младенцы знают о языке очень много. С самого рождения дети могут различать большинство гласных и согласных звуков в любом языке мира и воспринимают их как категории. Возьмем, к примеру, слоги [ба], [да] и [га]: даже если соответствующие звуки варьируются, мозг ребенка – как и мозг взрослого – воспринимает их как отдельные категории с четкими границами.

Эти врожденные навыки окончательно формируются под влиянием языковой среды в течение первого года жизни. Малыши быстро замечают, что некоторые звуки не встречаются в их языке: носители английского языка, например, никогда не произносят гласные, как французские [u] и [eu], а японцы не различают [p] и [л]. Всего за несколько месяцев (шесть для гласных, двенадцать для согласных) мозг ребенка проверяет свои первоначальные гипотезы и оставляет только те фонемы, которые релевантны для языка, используемого в его окружении.

Но это еще не все: малыши быстро начинают учить слова. Как они их идентифицируют? Прежде всего младенцы полагаются на просодию, ритм и интонацию: в устной речи мы постоянно повышаем или понижаем тон голоса, а также делаем паузы, тем самым отмечая границы между словами и предложениями. Другой механизм позволяет определить, какие звуки речи следуют друг за другом. И здесь дети ведут себя, как начинающие специалисты по статистике. Например, они понимают, что в английском языке за слогом [bo] часто следует слог [təl]. Быстрый расчет вероятностей подсказывает им, что это не случайно: вероятность того, что [təl] следует за [bo] слишком высока, а значит, эти слоги должны образовывать слово

bottle («бутылочка»). В результате слово добавляется к словарному запасу ребенка и впоследствии может быть соотнесено с конкретным предметом или понятием⁶⁵. Уже к шести месяцам дети вычлениают наиболее употребительные слова вроде «папа», «мама», «нога», «пить» и так далее. Эти слова настолько прочно отпечатываются в их памяти, что и во взрослом возрасте продолжают сохранять свой особый статус и обрабатываются быстрее, чем другие слова, обладающие сопоставимым значением, звуковым составом и частотностью, но приобретенные позже.

Статистический анализ также позволяет детям идентифицировать слова, которые встречаются особенно часто: прежде всего артикли и местоимения (*я, ты, он, она, оно*). К концу первого года жизни они уже знают многие из них и с их помощью ищут другие слова. Рассмотрим пример. Услышав, как один из родителей говорит: *I made a cake* («Я испекла торт»), малыши могут выделить короткие незначительные слова *I* («я») и *a* (неопределенный артикль) и, исключив их, обнаружить, что *made* («испекла») и *cake* («торт») – тоже слова. Они понимают, что существительное часто следует за артиклем, а глагол – за местоимением, а потому в возрасте около двадцати месяцев с крайним удивлением реагируют на бессвязные фразы типа *I bottle* (местоимение + существительное) или *the finishes* (артикль + глагол)⁶⁶.

Конечно, такой вероятностный анализ не всегда надежен. Например, услышав французскую конструкцию *un avion* («самолет»), в которой артикль *un* произносится слитно с существительным *avion*, многие дети делают ошибочный вывод о существовании слова *navion* (*Regarde le navion!*). Прямо противоположное произошло с носителями английского языка, которые решили позаимствовать французское слово *napperon* («салфетка под приборы»), но из-за неправильного членения конструкции *un napperon* в итоге изобрели слово *apron* («фартук»).

Впрочем, такие ошибки встречаются редко. Всего за несколько месяцев детям удается превзойти любой существующий алгоритм искусственного интеллекта. К своему первому дню рождения они уже заложили основу для базовых правил родного языка на нескольких уровнях, от элементарных звуков (фонем) до мелодики (просодии), словарного запаса (лексикона) и грамматических правил (синтаксиса).

Ни один другой вид приматов не обладает такими способностями. Этот эксперимент проводили не один раз: многие ученые обращались с детенышами шимпанзе, как с членами семьи, и пытались разговаривать с ними на английском языке, языке жестов или с помощью зрительных символов. Увы, даже спустя несколько лет ни одно из животных так и не овладело языком в том смысле, в каком понимаем его мы: они могли выучить максимум несколько сотен слов, но на этом все⁶⁷. Следовательно, лингвист Ноам Хомский, вероятно, был прав, утверждая, что наш вид рождается со встроенным «механизмом усвоения языка» – специализированной системой, которая автоматически запускается в первые годы жизни. Как писал Дарвин в своем эпохальном труде «Происхождение человека» (1871), «речь, конечно, не может быть отнесена к настоящим инстинктам, потому что она должна быть выучена. Она, однако, весьма отличается от всех обычных искусств, потому что человек обладает инстинктивным стремлением говорить»^[19]. Иными словами, всем нам присущ врожденный инстинкт овладения речью. Этот инстинкт настолько силен, что даже в тех популяциях, где язык изначально отсутствует, он самопроизвольно возникает в течение нескольких поколений. Например, установлено, что в сообществах глухих высокоструктурированный язык жестов с универсальными лингвистическими характеристиками появляется уже во втором поколении⁶⁸.

Глава 4

Рождение мозга

Ребенок рождается с мозгом, не завершившим своего развития, а вовсе не с «пустым», незаполненным мозгом, как утверждала некогда старая педагогика.

Гастон Башляр,

«Философское отрицание. Опыт философии нового научного духа»^[20].

Гений без образования подобен серебру, что еще в руднике.

Бенджамин Франклин (1706–1790)

Тот факт, что новорожденные младенцы многое знают о физических объектах, числах, людях и языках, опровергает некогда популярную гипотезу, согласно которой их мозг – «чистый лист», губка, жадно впитывающая все, что подсовывает ей окружающая среда. Отсюда вытекает простой прогноз: заглянув внутрь новорожденного мозга, мы должны обнаружить в нем хорошо организованные нейронные структуры, соответствующие каждой из основных областей знаний.

Долгое время эту идею рьяно оспаривали. Еще лет двадцать назад мозг новорожденного был *terra incognita*. Методы нейровизуализации только изобрели и еще не применяли для исследования развивающегося мозга, а потому в теоретических воззрениях того времени преобладал эмпиризм: считалось, что мозг рождается «пустым» и приобретает знания только под влиянием внешнего мира. Лишь с появлением методов магнитно-резонансной томографии (МРТ) мы наконец смогли увидеть организацию мозга на ранних стадиях его развития и подтвердить наши предположения. Как оказалось, в мозге новорожденного уже присутствуют практически все нейронные сети, характерные для мозга взрослого.

Организация мозга младенца

Моя жена, Гилен Деан-Ламбертц, и я вместе с нашей коллегой-неврологом Люси Герц-Паннье одними из первых использовали функциональную МРТ при обследовании двухмесячных детей⁶⁹. Разумеется, при этом мы полагались на опыт педиатров. Пятнадцатилетний клинический опыт убедил их, что МРТ – безвредное обследование, которое можно назначать людям любого возраста, включая недоношенных младенцев. Тем не менее практикующие врачи прибегали к этой технологии только в диагностических целях – главным образом для раннего выявления очаговых поражений. Раньше никто не использовал функциональную МРТ для изучения мозга нормально развивающихся детей. Что же касается нашей команды, то прежде всего нас интересовал следующий вопрос: могут ли их нейронные сети избирательно реагировать на определенные стимулы? Перед исследованием нам пришлось преодолеть целый ряд трудностей. Мы разработали специальный шумоподавляющий шлем, чтобы уберечь малыша от громкого воя машины, и уютную люльку, в которой он мог лежать неподвижно. Каждого испытуемого мы постепенно приучали к необычной среде, а во время процедуры не спускали с него глаз.

В итоге все наши усилия окупились: мы получили невероятные результаты. Мы решили сосредоточиться на речи: как нам было известно, в течение первого года жизни процесс овладения речью происходит крайне быстро. И действительно, наши наблюдения показали, что уже через два месяца после рождения в мозге младенцев, слышавших предложения на родном языке, активировались те же самые области, что и у взрослых (см. цветную иллюстрацию 6).

Когда мы слышим предложение, первой активируется первичная слуховая кора – область, куда стекается вся информация от органов слуха. Эта же область «вспыхивала» и в мозге ребенка. Вам это может показаться очевидным, но в то время мы плохо представляли, что происходит в голове очень маленьких детей. Некоторые исследователи полагали, что при

рождении сенсорные области детского мозга настолько дезорганизованы, что слух, зрение и осязание смешаны. По мнению этих ученых, ребенку требуется определенное время (несколько недель), чтобы научиться разделять эти сенсорные модальности⁷⁰. Сегодня мы знаем, что это не так: с самого рождения звуковые стимулы активируют слуховые области, визуальные – зрительные области, а осязательные – области, связанные с тактильными ощущениями. Никто из нас не учится этому специально. Разделение коры головного мозга на участки, обрабатывающие информацию от разных органов чувств, задано генами. Такая организация свойственна всем млекопитающим и своими корнями уходит в глубины эволюции (см. цветную иллюстрацию 7)⁷¹.

Но вернемся к нашему эксперименту и младенцам, которые слушали предложения, лежа в МРТ-сканере. Попав в первичную слуховую кору, информация распространялась быстро. Через долю секунды «вспыхивали» и другие области, причем всегда в одной и той же последовательности: сначала вторичная слуховая кора, примыкающая к первичной, затем целый ряд участков височной доли и, наконец, зона Брока у основания левой лобной доли одновременно с верхней частью височной доли. Эта сложная цепочка обработки информации, расположенная в левом полушарии, удивительно похожа на цепочку обработки информации у взрослого человека. В два месяца у младенцев активируется та же иерархия фонологических, лексических, синтаксических и семантических областей мозга, что и у взрослых. И, как и у взрослых, чем выше поднимается сигнал в иерархии коры, тем медленнее реагирует мозг и тем выше уровень интеграции информации (см. цветную иллюстрацию 6)⁷².

Конечно, двухмесячные младенцы еще не понимают предложений, которые слышат; им только предстоит открыть для себя слова и грамматические правила. И все же лингвистическая информация активирует у детей те же высокоспециализированные совокупности нейронов, что и у взрослых. Почему же младенцы так быстро учатся понимать речь и говорить, хотя все остальные приматы на это не способны? Вероятно, все дело в том, что их левое полушарие снабжено заранее заданной иерархией нейронных сетей, которые специализируются на обнаружении статистических закономерностей во всех аспектах речи: звуке, слове, предложении и тексте.

Речевые «магистральи»

Все вышеупомянутые области мозга активируются в определенном порядке потому, что тесно связаны друг с другом. За последнее время мы многое узнали о том, какие нейронные пути соединяют речевые центры у взрослых. В частности, специалисты по нейроанатомии обнаружили, что большой «кабель», состоящий из миллионов нервных волокон – дугообразный пучок, – соединяет височные и теменные центры в задней части мозга с лобными центрами, прежде всего со знаменитой зоной Брока. Этот пучок связей – маркер эволюции языка. Например, он значительно больше в левом полушарии, которое у 96 процентов правой посвящено языку. Эта асимметрия уникальна для человека и не наблюдается у других приматов, даже у наших ближайших родственников – шимпанзе.

Опять-таки данная анатомическая характеристика не является результатом научения: она присутствует с самого начала. Кроме того, исследуя мозг младенца, мы видим, что при рождении полностью сформирован не только дугообразный пучок, но и все прочие основные пучки волокон, соединяющие корковые и подкорковые центры (см. цветную иллюстрацию 8)⁷³.

Эти «магистральи» мозга закладываются в течение третьего триместра беременности. В процессе формирования коры аксон каждого возбуждающего нейрона «отправляется исследовать» окружающие области, иногда в радиусе до нескольких сантиметров – эдакий нейронный Христофор Колумб. Направление роста аксона регулируется химическим способом – концентрацией определенных молекул, которая варьируется от одной области к другой и служит своеобразной пространственной меткой. Терминали (концевые участки) аксона буквально вынюхивают химический путь, проложенный генами, и определяют направление, в котором следует двигаться. Таким образом, без какого-либо вмешательства из внешнего мира мозг самоорганизуется в сеть перекрестных связей, некоторые из которых присущи только человеку. Как мы вскоре увидим, эта сеть может быть дополнительно усовершенствована посредством научения, однако основа ее формируется еще в период внутриутробного развития.

Удивительно, правда? Каких-то двадцать лет назад многие исследователи считали крайне маловероятным, что мозг может представлять собой нечто иное, нежели беспорядочную массу случайных связей⁷⁴. У них и в мыслях не было, что наша ДНК, содержащая лишь ограниченное количество генов, может включать детальный план высокоспециализированных нейронных сетей, опосредующих зрение, речь и моторику. Но это некорректное рассуждение. Наш геном содержит все детали нашего тела: он точно знает, как создать сердце с четырьмя камерами, два глаза, двадцать четыре позвонка, внутреннее ухо и три его перпендикулярных канала, десять пальцев и их фаланги... Так почему бы не создать мозг с множеством внутренних областей и подобластей?

Новейшие исследования показали, что уже в первые два месяца беременности, когда пальцы руки находятся еще в зачаточном состоянии, в них проникают три нерва – лучевой, срединный и локтевой, – каждый из которых нацелен на определенные конечные точки (см. цветную иллюстрацию 8)⁷⁵. Та же самая высокоточная механика может существовать и в мозге: подобно тому как из зачатка кисти формируются пять пальцев, кора подразделяется на несколько десятков узкоспециализированных областей, разделенных четкими границами (см. цветную иллюстрацию 9)⁷⁶. Уже в первые месяцы беременности многие гены избирательно экспрессированы в разных точках коры⁷⁷. Примерно на двадцать восьмой неделе внутриутробного развития мозг начинает сворачиваться, и появляются основные борозды. На тридцать пятой неделе у плода уже сформированы все главные складки коры, и наблюдается характерная асимметрия височной области, содержащей речевые центры⁷⁸.

Самоорганизация коры

Во время беременности развиваются не только корковые связи, но и соответствующие корковые складки. Во втором триместре кора головного мозга сначала абсолютно гладкая; затем появляется первый ряд гребней, напоминающих мозг обезьяны; наконец, возникают вторичные и третичные складки, типичные для человеческого мозга, – целое множество складок. Их последовательное развитие постепенно становится все более зависимым от деятельности нервной системы. В зависимости от обратной связи, которую мозг получает от органов чувств, одни нейронные сети стабилизируются, а другие, бесполезные, дегенерируют. Именно поэтому складчатость моторной коры немного отличается у левшей и правшей. Примечательно, что для левшей, которых в детстве заставляли писать правой рукой, характерен своего рода компромисс: форма их моторной коры типична для левши, но ее размер демонстрирует левостороннюю асимметрию правши⁷⁹. Как заключают авторы этого исследования, «морфология коры головного мозга у взрослых хранит свидетельства как врожденных сдвигов, так и раннего опыта».

Складки в коре плода обязаны своим спонтанным формированием процессу биохимической самоорганизации, который зависит как от генов, так и от химического окружения клеток. Этот процесс нуждается в крайне скудной генетической информации и не требует никакого научения⁸⁰. Такая самоорганизация далеко не так парадоксальна, как кажется: на самом деле, она встречается повсюду. Представьте, что кора головного мозга – это песчаный пляж, на котором под действием приливов и отливов образуются многочисленные наносы и углубления. Или представьте ее как пустыню, в которой безжалостный ветер день за днем создает впадины и дюны. На самом деле, полосы, пятна и шестиугольные клетки встречаются во всех типах биологических и физических систем: от отпечатков пальцев до полос зебры и пятен леопарда, базальтовых колонн в вулканах, песчаных дюн и облаков в летнем небе, расположенных на равном расстоянии друг от друга. Алан Тьюринг первым объяснил это явление: оказывается, нужно лишь локальное усиление и торможение на некотором расстоянии. Когда ветер дует над пляжем и песчинки начинают собираться в кучки, «запускается» процесс самоамплификации: зарождающийся бугорок ловит другие песчинки, в то время как за ним ветер завихряется и заставляет песок осыпаться; через несколько часов получается дюна. Иными словами, при наличии некоего источника локального возбуждения и торможения возникает плотная область (дюна), окруженная менее плотной областью (вогнутая сторона), за которой следует другая дюна, и так до бесконечности. В зависимости от конкретных обстоятельств спонтанно возникающие узоры образуют пятна, полосы или шестиугольники.

В развивающемся мозге самоорганизация широко распространена: наша кора изобилует колонками, полосами и четкими границами. По всей вероятности, пространственная

сегрегация – один из механизмов, с помощью которых гены закладывают нейронные модули, специализирующиеся на обработке разных типов информации. Зрительная кора, например, покрыта чередующимися полосами, которые обрабатывают информацию, поступающую от левого и правого глаз, – их называют глазными доминантными колонками. В развивающемся мозге они появляются самопроизвольно, используя сигналы, порождаемые внутренней активностью сетчатки. Впрочем, аналогичные механизмы самоорганизации могут действовать и на более высоком уровне, захватывая не только поверхность коры, но и более абстрактное пространство. Одним из ярчайших примеров являются *нейроны решетки* – клетки, которые кодируют местоположение крысы, накладывая на пространство воображаемую координатную сетку из треугольников и шестиугольников (см. цветную иллюстрацию 10).

Клетки решетки – это нейроны, локализованные в особой области мозга крысы, так называемой энторинальной коре. В 2014 году Эдвард Мозер и Мэй-Бритт Мозер получили Нобелевскую премию за открытие их замечательных геометрических свойств. Именно эти ученые первыми записали активность нейронов энторинальной коры во время перемещения животного по очень большой комнате⁸¹. Тогда мы уже знали, что в соседней структуре – гиппокампе – имеются специальные «нейроны места», которые срабатывают только в том случае, если животное находится в некой определенной точке пространства. Революционное открытие Мозеров заключалось в том, что клетки решетки не реагируют на одно конкретное место, а имеют множественные области возбуждения, распределенные по всей окружающей среде. Области возбуждения строго упорядочены: они образуют сеть равносторонних треугольников, сгруппированных в шестиугольники, похожие на пятна жирафа или базальтовые колонны в вулканических породах! Когда животное движется даже в темноте, нейроны решетки подсказывают ему, где оно находится по отношению к сети треугольников, охватывающей все пространство. Нобелевский комитет справедливо назвал эту систему «навигатором мозга»: она обеспечивает надежную нейронную систему координат, отображающую внешнее пространство в виде карты.

Но почему нейроны используют треугольники и шестиугольники, а не прямоугольники и перпендикулярные линии обычных карт? Начиная с Декарта, математики и картографы всегда полагались на две перпендикулярные оси, получившие название «декартовых координат» (x и y , абсцисса и ордината, долгота и широта). Почему же мозг крысы предпочитает набор треугольников и шестиугольников? Скорее всего потому, что нейроны решетки самоорганизуются в процессе развития, а в природе такая самоорганизация часто приводит к образованию шестиугольников – от шкуры все того же жирафа до ульев и вулканических колонн. Сегодня физики наконец-то разобрались, почему гексагональные формы так распространены: они самопроизвольно возникают всякий раз, когда за счет постепенного остывания система переходит от неорганизованного «горячего» состояния к устойчивой структуре (см. цветную иллюстрацию 10). Похожую теорию исследователи предложили и для объяснения появления клеток решетки в энторинальной коре в ходе развития мозга: дезорганизованные группы нейронов постепенно формируют организованную группу клеток решетки, при этом шестиугольники появляются как самовозникающий аттрактор динамики коры⁸². Согласно этой теории, крысе не требуются какие-либо обучающие сигналы, чтобы создать сеткообразную карту. На самом деле, формирование этой нейронной сети не предполагает никакого обучения вообще: она естественным образом возникает из динамики развивающейся коры.

В настоящее время теорию самоорганизации карт мозга проверяют ученые. Эксперименты показывают, что у крыс «встроенный навигатор» в самом деле появляется на очень ранних стадиях развития. Двум независимым группам исследователей удалось вживить электроды в новорожденных крысят, которые только-только начали ходить⁸³. Главный вопрос был сформулирован следующим образом: действительно ли к этому времени в энторинальной коре уже имеются нейроны решетки, нейроны места и нейроны направления головы – третий тип клеток, действующих наподобие корабельного компаса и срабатывающих, когда животное движется в определенном направлении, например на северо-запад или юго-восток. В итоге исследователи обнаружили, что вся система является практически врожденной: активность нейронов направления головы регистрируется с самого начала, а нейроны места и нейроны решетки появляются через один или два дня после того, как крысята начинают самостоятельно перемещаться в пространстве.

Эти данные, безусловно, интересны, но не удивительны: для большинства животных, от муравьев до птиц, рептилий и млекопитающих, составление карт – важная задача. Начиная исследовать мир, щенки, котята и человеческие младенцы должны точно знать, где находятся, и уметь найти дорогу домой, где их ждут мамы. Без этого выживание невозможно. В далеком прошлом эволюция, похоже, нашла способ снабдить новорожденный мозг компасом, картой и подробным «журналом» всех мест, в которых он побывал.

Неужели такая нейронная навигационная система существует и в человеческом мозге? Да. На основании косвенных данных мы знаем, что мозг взрослого человека тоже содержит нейронную карту с гексагональной симметрией, причем расположена она в том же самом месте, что и у крыс (энторинальная кора)⁸⁴. Кроме того, мы знаем, что даже очень маленькие дети обладают развитым чувством пространства. Малыши от года и старше без труда ориентируются в комнате: если их перенести из точки А в точку В, а затем в точку В, они запросто смогут вернуться из точки В в точку А по прямой – и, что примечательно, сделают это, даже если слепы от рождения. Следовательно, в мозге детенышей человека, как и крысы, имеется специальный модуль для пространственной навигации⁸⁵. К сожалению, пока нам не удалось непосредственно увидеть эту карту: получить изображение работающего мозга в столь юном возрасте крайне трудно (попробуйте сделать МРТ ребенку, который все время куда-то ползет!). И тем не менее мы уверены, что найдем ее, как только появятся соответствующие мобильные методы исследования.

На самом деле, в мозге ребенка существуют и другие специализированные модули – примеров множество. В частности, мы знаем, что в возрасте нескольких месяцев (хотя, возможно, и не с самого рождения) зрительная кора уже содержит область, которая реагирует преимущественно на лица, а не на изображения домов⁸⁶. По всей видимости, ее формирование частично является результатом научения, однако строго регулируется связанностью мозга – конфигурацией межнейронных связей. Эти связи гарантируют, что у всех людей за распознавание лиц отвечает одно и то же место, плюс-минус несколько миллиметров. В результате образуется один из самых специфических модулей коры – участок, до 98 процентов нейронов которого специализируются на лицах и практически не реагируют на другие образы.

Возьмем другой пример. Установлено, что уже в самом раннем возрасте теменная кора способна реагировать на количество объектов⁸⁷. При этом активность регистрируется в той же самой области, которая задействована у взрослых, когда они складывают 2 и 2, и у обезьян, запоминаящих, сколько предметов им показали. Что касается обезьян, немецкий нейробиолог Андреас Нидер доказал: этот участок коры действительно содержит нейроны, чувствительные к количеству объектов, – существуют нейроны для одного объекта, двух, трех и так далее. Как ни странно, эти нейроны присутствуют даже в том случае, если данную конкретную обезьяну никогда не учили решать числовые задачи. Таким образом, логично предположить, что модули формируются до рождения и в дальнейшем продолжают развиваться под влиянием окружающей среды. Я и мои коллеги разработали точную математическую модель самоорганизации числовых нейронов, основанную на волнообразном распространении активности по поверхности развивающейся коры. Предложенная нами теория может объяснить свойства числовых нейронов во всех подробностях. Согласно модели, клетки образуют своего рода числовую прямую – линейную цепочку, которая спонтанно возникает из сети случайно соединенных нейронов, в которой числа один, два, три, четыре и так далее расположены последовательно⁸⁸.

Концепция самоорганизации радикально отличается от классического (но ошибочного) представления о мозге как о *tabula rasa* – «чистом листе», преимущественно лишенном первоначальной структуры и обретающем форму исключительно под влиянием окружающей среды. На самом деле, чтобы мозг мог построить карту или числовую прямую, требуется очень мало данных (или они не требуются вообще). Именно самоорганизация отличает мозг от искусственных нейронных сетей, доминирующих в инженерном подходе к искусственному интеллекту. Сегодня ИИ практически синонимичен большим данным. Все потому, что эти сети невероятно «прозорливы»: они начинают действовать разумно только после того, как им скормят гигабайты данных. Человеческий мозг, напротив, не требует столь обширного опыта. Его основные узлы – модули, в которых хранятся ключевые знания, – развиваются главным образом спонтанно, возможно, только за счет внутреннего моделирования.

Лишь немногие современные ученые, такие как профессор Массачусетского технологического института Джош Тененбаум, всерьез пытаются внедрить данный тип

самоорганизации в искусственный интеллект. В настоящее время Тененбаум и его коллеги работают над «виртуальным ребенком» – системой, которая была бы изначально способна самостоятельно генерировать миллионы мыслей и образов. Предполагается, что эти внутренние данные послужат основой для обучения остальной части системы, а потому в дальнейшем ей не потребуются никаких дополнительных сведений извне. Согласно этой радикальной теории, фундамент ключевых нейронных сетей закладывается посредством самоорганизации еще до рождения, путем самозагрузки из базы данных, генерируемой внутри системы⁸⁹. Большая часть подготовительных работ осуществляется внутри, в отсутствие какого-либо взаимодействия с внешним миром; остается произвести только окончательные корректировки на основании дополнительных данных, которые мы получаем из окружающей среды.

Вывод, вытекающий из этого направления исследований, акцентирует совокупную роль генов и самоорганизации в развитии человеческого мозга. При рождении кора ребенка сложена почти так же, как у взрослого. Она уже разделена на специализированные сенсорные и когнитивные области, взаимосвязанные точными и воспроизводимыми пучками волокон, и содержит целый набор частично специализированных модулей, каждый из которых проецирует определенный тип представлений на внешний мир. Нейроны решетки энторинальной коры рисуют двумерные плоскости, идеально подходящие для навигации в пространстве. Как мы увидим далее, другие области, например теменная кора, рисуют линии, позволяющие кодировать линейные величины, включая количество, размер и время; зона Брока проецирует древовидные структуры, идеально подходящие для кодирования синтаксиса языков. Иными словами, от нашей эволюции мы наследуем набор фундаментальных правил; впоследствии мы выберем из них те, которые наилучшим образом описывают ситуации и понятия, с которыми нам придется столкнуться в течение жизни.

Истоки индивидуальности

Постулируя существование универсальной человеческой природы, врожденной системы нейронных связей, формирующейся благодаря генам и самоорганизации, я вовсе не отрицаю существование индивидуальных различий. Приглядевшись, мы увидим, что каждому мозгу с самого начала присущи его собственные, уникальные черты. Например, складки коры, как и отпечатки пальцев, закладываются до рождения и отличаются даже у однояйцевых близнецов. Аналогичным образом сила и плотность дальних связей и даже их точные траектории существенно варьируются, обеспечивая неповторимость каждого «коннектома».

Тем не менее важно понимать, что эти вариации не затрагивают общую основу, которая остается неизменной. Мозг *Homo sapiens* формируется согласно четкому плану, подобно последовательности аккордов, которые запоминают джазовые музыканты, разучивая новую мелодию. Превратности генома и беременности, разумеется, могут внести свои коррективы, однако никакие импровизации не заглушат основную «нейронную тему», характерную для всех людей. Наша индивидуальность реальна, но переоценивать ее не следует: каждый из нас есть всего-навсего вариация на мелодическую линию *Homo sapiens*. У каждого из нас – черного и белого, азиата и коренного американца – архитектура мозга очевидна. С этой точки зрения кора любого человека отличается от коры нашего ближайшего родственника, шимпанзе, точно так же, как любая импровизация на тему *My Funny Valentine* отличается, скажем, от импровизации на тему *My Romance*^[21].

Всем нам изначально присущи одинаковая структура мозга, одинаковые базовые знания и одинаковые алгоритмы научения, которые позволяют приобретать дополнительные навыки. Все мы обладаем одинаковым человеческим потенциалом – будь то в чтении, естественных науках или математике, причем независимо от того, слепы мы, глухи или немые. Как заметил в XIII веке британский философ Роджер Бэкон (1220–1292), «математические знания как бы врожденны... Эта наука самая легкая, что очевидно из того, что она доступна уму каждого. Ибо миряне и люди, вовсе не умеющие читать и писать, умеют считать...» То же самое, безусловно, можно сказать и о речи: практически нет детей, которые не испытывали бы мощного врожденного стремления овладеть языком своего окружения, хотя, как я уже отмечал выше, ни один шимпанзе – даже тот, который с рождения живет в человеческой семье, – не способен произнести больше нескольких слов или соединить больше нескольких знаков.

Вкратце: индивидуальные различия реальны, но почти всегда носят скорее количественный, нежели качественный характер. Лишь в крайних точках колоколообразной кривой мозговой организации нейробиологические вариации могут привести к фактическим когнитивным различиям. В последнее время все больше ученых приходят к выводу, что дети с нарушениями развития находятся на концах этой кривой. В какой-то момент их развивающийся во время беременности мозг будто свернул с правильного пути, который ведет от генетического наследования к миграции нейронов и самоорганизации нейронных сетей.

Особенно это очевидно в случае дислексии, специфического нарушения развития, которое влияет на способность к овладению чтением, но не затрагивает интеллект и другие функции. Если вы страдаете дислексией, вероятность ее наличия у ваших братьев и сестер составляет 50 процентов, что указывает на генетическую природу этого расстройства. Сегодня с дислексией ассоциируют по меньшей мере четыре гена – большинство из них приводят к нарушениям миграции нейронов в коре головного мозга в период внутриутробного развития⁹⁰. Кроме того, МРТ показывает выраженные аномалии в нейронных связях левого полушария, отвечающих за чтение⁹¹. Что важно, эти аномалии могут быть обнаружены в самом раннем возрасте. Например, в группе детей с генетической предрасположенностью к дислексии способность различать фонемы устной речи уже в шесть месяцев позволяет определить, у кого проявится это нарушение, а кто будет читать нормально⁹². И действительно, фонологический дефицит считается главным фактором возникновения дислексии. Впрочем, он отнюдь не является ее единственной причиной: механизм чтения достаточно сложен, а значит, есть много мест, где он может дать сбой. В настоящее время описаны разные типы дислексии, включая дефицит внимания, из-за которого ребенок путает буквы в соседних словах⁹³, и зрительные нарушения, которые приводят к «зеркальным» ошибкам⁹⁴. Судя по всему, дислексия находится в нижней точке колоколообразного континуума зрительных, слуховых и фонологических способностей, которые варьируются от нормы до выраженного дефицита⁹⁵. Все мы *Homo sapiens*, но немного отличаемся друг от друга по степени проявления нашего наследия, что, по всей вероятности, обусловлено полуслучайными вариациями в формировании нейронных сетей на ранних стадиях.

Практически то же самое можно сказать и о других аномалиях развития. Дискалькулия, например, связана с меньшим объемом серого и белого вещества в дорсальных теменных и лобных отделах, отвечающих за вычисления и математические способности⁹⁶. У преждевременно рожденных детей с перивентрикулярными инфарктами в теменной области, отвечающей за «чувство числа», риск дискалькулии особенно высок⁹⁷. Неврологическая дезорганизация на ранней стадии развития может вызвать дискалькулию – либо непосредственно воздействуя на базовые знания о множествах и величинах, либо отсоединяя их от других областей, задействованных в усвоении цифровых слов и арифметических символов. В любом случае результатом является предрасположенность к трудностям в овладении математикой. Таким детям, вероятно, потребуется дополнительная помощь, чтобы укрепить их слабые интуитивные представления о числах.

Поскольку наш разум мыслит крайностями (черное – белое, хорошее – плохое), мы склонны преувеличивать последствия научных открытий касательно генетической природы нарушений развития. Ни один из генов, ассоциированных с дислексией, дискалькулией или, если уж на то пошло, любой другой патологией в развитии, включая аутизм и шизофрению, не является стопроцентным приговором. Самое большее, на что способны гены, – это склонить чашу весов в ту или иную сторону. Не менее важную роль в пути развития, по которому в конечном счете пойдет ребенок, играет окружающая среда. Мои коллеги, работающие в сфере специального образования, убеждены: при достаточных усилиях любая форма дислексии и дискалькулии поддается коррекции. А значит, настало время обратиться ко второму главному игроку в развитии мозга – нейропластичности.

Глава 5

Роль окружающей среды

Всякий человек знает, что умение играть на фортепиано... требует долгих лет психической и физической тренировки. Чтобы понять этот важный феномен, необходимо признать, помимо усиления ранее сложившихся нейронных связей, факт формирования новых путей за счет рамификации и прогрессивного роста терминальных дендритных и аксонных отростков.

Сантьяго Рамон-и-Кахаль (1904)

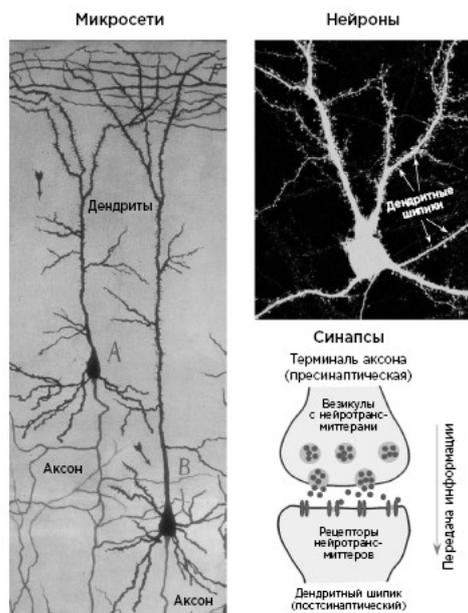
Выше я писал о фундаментальной роли природы в формировании нашего мозга – взаимосвязи генов и самоорганизации. В этой главе мы обсудим влияние другого, не менее важного фактора – окружающей среды. Ранняя организация мозга не остается неизменной навсегда: опыт совершенствует и обогащает ее. Но как научение меняет нейронные связи в мозге ребенка? Чтобы это выяснить, вернемся на столетие назад, к революционным открытиям великого испанского анатома Сантьяго Рамона-и-Кахаля (1852–1934).

Кахаль – один из героев нейробиологии. Вооружившись микроскопом, этот гениальный ученый и художник составил первую карту микроорганизации мозга и создал реалистичные, но упрощенные рисунки нейронных сетей – настоящие шедевры, которые входят в число ключевых работ в сфере научных иллюстраций. Но главное – он смог перейти от наблюдений к интерпретации, от анатомии к функции. Хотя микроскоп показывал только посмертную анатомию нейронов и их связей, Кахаль сумел сделать смелые и точные выводы о том, как они функционируют.

Величайшее открытие Кахаля, за которое он был удостоен Нобелевской премии в 1906 году, вкратце можно сформулировать так: мозг состоит из отдельных нервных клеток (нейронов), а не из единой сети, ретикулума, как считалось ранее. Кроме того, Кахаль установил, что в отличие от большинства других клеток – например, более или менее круглых и компактных эритроцитов – нейроны принимают невероятно сложные формы. Так, типичный нейрон имеет множество дендритов. Дендриты одного нейрона называются «дендритным деревом». Оно состоит из нескольких тысяч ветвей, каждая из которых больше предыдущей (по-гречески «дендрон» означает «дерево»). Вместе популяции нейронов образуют сложную паутину переплетенных отростков.

Столь сложное строение не обескуражило нашего испанского нейробиолога. В рисунки, сыгравшие важную роль в истории нейробиологии и изображавшие детальную анатомию коры и гиппокампа, Кахаль добавил нечто чрезвычайно простое, но в высшей степени наглядное и имеющее большое теоретическое значение: стрелки! Стрелки Кахаля указывают направление, в котором движутся нервные импульсы: от дендритов к телу нейрона и, наконец, вдоль аксона. Это было смелое предположение, но верное. Кахаль догадался, что форма нейронов отражает их функцию: с помощью дендритного дерева нейрон собирает информацию от других клеток, после чего компилирует ее в своем теле, чтобы отправить дальше только одно сообщение. Это сообщение – так называемый потенциал действия, пиковый потенциал, или спайк, – затем передается по аксону, длинной плетеной лиане, которая тянется к тысячам других нейронов, иногда расположенных на расстоянии нескольких сантиметров от самого тела клетки.

Другое чрезвычайно важное открытие Кахаля – это синапсы. Хотя Кахаль был уверен, что каждый нейрон – это отдельная клетка, микроскоп показал, что в определенных точках эти клетки вступают в контакт друг с другом. Сегодня мы называем эти места синапсами. (Открытие принадлежит Кахалю, однако само название придумал в 1897 году другой ученый – великий британский физиолог Чарльз Шеррингтон [1857–1952].) Каждый синапс представляет собой место встречи двух нейронов – точнее, место, где аксон одного нейрона встречается с дендритом другого нейрона. Аксон пресинаптического нейрона продолжает расти, пока не встретится с дендритом второго, постсинаптического нейрона и не подсоединится к нему.



Нейроны, синапсы и микросети, которые они образуют, – материальная часть пластичности мозга: они изменяются всякий раз, когда мы учимся. Каждый нейрон представляет собой отдельную клетку с «дендритным деревом» (вверху слева), которое собирает информацию от других нейронов, и аксоном (внизу слева), который посылает сообщения другим нейронам. В микроскоп также хорошо видны дендритные шипики – похожие на грибы мембранные выросты, образующие синапсы – места контакта между двумя нейронами. Когда мы учимся, все эти элементы могут меняться: наличие, количество и сила синапсов; размер дендритных шипиков; количество дендритных ветвей и аксонов; даже количество слоев миелина, который изолирует аксоны и определяет скорость передачи информации.

Что происходит в синапсе? Другой лауреат Нобелевской премии, нейрофизиолог Томас Зюдхоф, посвятил этому вопросу все свои исследования и пришел к выводу, что синапсы суть вычислительные элементы нервной системы – подлинные нанопроцессоры мозга. Если вы помните, наш мозг содержит около тысячи триллионов синапсов. Сложность такого устройства поистине беспримерна. Рассмотрим его в самых общих чертах. Сообщение, которое передается по аксону, по природе своей электрическое, но большинство синапсов преобразуют его в химическое. Концевые участки аксона, терминалы, содержат пузырьки – везикулы, крошечные кармашки, заполненные так называемыми нейротрансмиттерами (например, глутаматом). Когда электрический сигнал достигает терминалы аксона, везикулы открываются, и молекулы нейротрансмиттера попадают в синаптическое пространство, отделяющее один нейрон от другого. Как следует из самого названия, нейротрансмиттеры передают сообщение от одного нейрона к следующему. Через мгновение после выхода из везикул пресинаптической терминалы молекулы нейротрансмиттера прикрепляются к мембране второго, постсинаптического нейрона в определенных точках, называемых рецепторами. Нейротрансмиттеры подходят к рецепторам так же, как ключ к замку: они буквально открывают двери в мембране постсинаптического нейрона. Ионы, положительно или отрицательно заряженные атомы, вливаются в эти открытые каналы и генерируют электрический ток внутри постсинаптического нейрона. Цикл завершен: электрический сигнал преобразовался в химический, затем обратно к электрический и в ходе этого процесса преодолел пространство между двумя нейронами.

Какое это имеет отношение к научению? Что ж, на протяжении всей жизни наши синапсы постоянно меняются, и эти изменения отражают то, чему мы учимся⁹⁸. Каждый синапс – это крошечный химический завод, многие элементы которого могут изменяться в процессе научения: количество везикул, их размер, количество рецепторов, их эффективность, даже размер и форма самого синапса... Все эти параметры, во-первых, влияют на силу, с которой пресинаптический электрический сигнал будет передан второму,

постсинаптическому нейрону, а во-вторых, обеспечивают пространство для хранения усвоенной информации.

Разумеется, изменения синаптической силы происходят не случайно: как правило, они стабилизируют активность нейронов за счет усиления их способности возбуждать друг друга, если эти самые нейроны уже делали так в прошлом. Еще в 1949 году психолог Дональд Хебб (1904–1985) сформулировал следующее базовое правило: нейроны, которые срабатывают вместе, связываются друг с другом. Иными словами, если два нейрона активируются одновременно или в тесной последовательности друг за другом, их связь усиливается. Таким образом, если постсинаптический нейрон срабатывает через несколько миллисекунд после срабатывания пресинаптического нейрона, сила синаптической связи возрастает: в будущем передача информации между этими двумя нейронами будет более эффективной. Если, с другой стороны, синапс не проводит сигнал и постсинаптический нейрон не срабатывает, синаптическая связь ослабевает.

Сегодня мы понимаем, почему этот феномен стабилизирует нейронную активность: он усиливает связи, которые хорошо работали в прошлом. Синаптические изменения, следующие правилу Хебба, повышают вероятность того, что тот же тип активности возникнет снова. Благодаря синаптической пластичности обширные нейронные сети, каждая из которых соткана из миллионов клеток, возбуждаются друг за другом в точном и воспроизводимом порядке. Мышь, выбирающая оптимальный маршрут в лабиринте; скрипач, извлекающий фонтан нот из своих пальцев; ребенок, декламирующий стихотворение, – каждый из этих сценариев рождает нейрональную симфонию, в которой всякое движение, нота или слово записываются сотнями миллионов синапсов.

Конечно, мозг не ведет учет всех событий, которые произошли в нашей жизни. В синапсах запечатлеваются только те моменты, которые он считает наиболее важными. Синаптическая пластичность модулируется нейротрансмиттерами, в частности ацетилхолином, дофамином и серотонином, которые сигнализируют, что конкретно заслуживает места в нашей памяти. Например, дофамин – это нейромедиатор, связанный с вознаграждением: едой, сексом, наркотиками... и да, даже рок-н-роллом!⁹⁹ Дофаминовая система реагирует на все, что мы любим, на каждый стимул, к которому мы выработали «зависимость». Именно она сообщает остальному мозгу, что текущие ощущения носят позитивный характер и превосходят ожидания. Ацетилхолин – напротив, нейромедиатор более общего толка, который сопряжен со всеми важными моментами, как приятными, так и трагическими. Например, многие американцы могут вспомнить мельчайшие подробности того, что они делали 11 сентября 2001 года, когда узнали о нападении на Всемирный торговый центр. Почему? Потому что в тот день ураган нейромедиаторов пронесся по их нейронным сетям, вызвав массовые изменения в синапсах. Одна такая сеть особенно важна: это миндалевидное тело – группа подкорковых нейронов, которые активируются главным образом в ответ на сильные эмоции и посылают сигналы в близлежащий гиппокамп, где хранятся важнейшие эпизоды нашего существования. Таким образом, синаптические модификации в первую очередь акцентируют те факты нашей жизни, которые эмоциональные системы мозга сочли наиболее значимыми.

Способность синапсов к модификации на основе активности пресинаптических и постсинаптических нейронов первоначально была обнаружена в искусственных условиях. Исследователям пришлось стимулировать нейроны очень быстрыми и сильными электрическими разрядами, прежде чем сила их синапсов изменилась. После этого травматического опыта синапсы несколько часов пребывали в модифицированном состоянии, которое получило название «долговременной потенциации» и казалось идеальным для сохранения воспоминаний на длительный срок¹⁰⁰. Но используется ли этот механизм мозгом для хранения информации в нормальных условиях? Первые данные удалось получить от аплизии калифорнийской – морского слизня с гигантскими нейронами. Это существо лишено мозга в привычном смысле этого слова, зато обладает большими скоплениями нервных клеток, называемых ганглиями. Именно в этих структурах нобелевский лауреат Эрик Кандел обнаружил целый каскад синаптических и молекулярных модификаций, вызванных классическим обусловливанием (животное приучалось ждать пищу, почти как собака Павлова)¹⁰¹.

По мере развития методов визуализации синапсов ученые смогли убедиться и в той немаловажной роли, которую играет синаптическая пластичность в научении. Синаптические изменения происходят именно в тех системах, которые животное использует для научения.

Когда мышь учится избегать места, где она получила небольшой удар током, синапсы гиппокампа – структуры, отвечающей за пространственную и эпизодическую память, – изменяются¹⁰²: связи между гиппокампом и миндалевидным телом «запоминают» травматический опыт. Когда мышь пугается звука, аналогичные изменения претерпевают синапсы, соединяющие миндалевидное тело со слуховой корой¹⁰³. Примечательно, что эти изменения не просто происходят во время научения: по-видимому, они играют в нем каузальную роль. Одно из доказательств состоит в следующем: если в течение нескольких минут после травматического события вмешаться в молекулярные механизмы, позволяющие синапсам менять свою силу в ответ на научение, животное в конечном итоге ничего не запомнит¹⁰⁴.

Память

Что такое память? И каков ее физиологический базис в мозге? Большинство исследователей разграничивают периоды кодирования и запоминания¹⁰⁵.

Начнем с кодирования. Все наши чувственные ощущения, действия и мысли зависят от активности определенного подмножества нейронов (в то время как другие пребывают в неактивном или даже ингибированном состоянии). Тип этих активных нейронов, локализованных во многих областях мозга, определяет содержание наших мыслей. Когда я вижу, скажем, Дональда Трампа в Овальном кабинете, одни нейроны (в нижней части височной доли) реагируют на его лицо, другие (в верхней части височной доли) – на его голос, третьи (в парагиппокампальной области) – на убранство его кабинета, и так далее. Единичные нейроны могут обеспечивать некоторую информацию, однако воспоминание в целом всегда кодируется несколькими взаимосвязанными группами нервных клеток. Допустим, я столкнулся на работе с коллегой. Каскад активности несколько иной группы нейронов позволит мне не спутать его с президентом, а его кабинет – со знаменитой овальной комнатой. Различные группы нейронов кодируют разные лица и места, но, поскольку эти нейроны взаимосвязаны, один вид Белого дома наверняка вызовет в памяти лицо Трампа. С малоизвестным коллегой этот номер не пройдет: едва ли я узнаю его вне рабочего контекста – например, в спортзале.

Теперь предположим, что я увидел президента в Овальном кабинете и что мои эмоциональные системы сочли этот опыт достаточно важным, чтобы сохранить его в памяти. Что будет делать мой мозг? Чтобы «зафиксировать» это событие, недавно активированные нейроны претерпевают выраженные физиологические изменения. Они изменяют силу своих взаимосвязей, тем самым повышая вероятность того, что эта же группа нейронов сработает в будущем. Одни синапсы становятся физически больше, другие дублируются. Нейроны-мишени могут отрастить новые шипики, терминалы или дендриты. Все эти анатомические модификации предполагают экспрессию новых генов в течение нескольких часов или даже дней. Эти изменения – физический базис научения: в совокупности они образуют субстрат для памяти.

Как только синаптическая память сформирована, нейроны могут отдохнуть: память остается спящей, бессознательной, но вписанной в саму анатомию моих нейронных сетей. В будущем благодаря этим связям одной внешней подсказки (скажем, фотографии президентского кабинета) будет достаточно, чтобы вызвать каскад нейронной активности в исходной сети. Этот каскад восстановит паттерн нейронных разрядов, подобный тому, который имел место в момент формирования воспоминания, и в конечном счете позволит мне узнать лицо Дональда Трампа. Согласно этой теории, каждое восстановленное воспоминание есть реконструкция; припоминание – это попытка воспроизвести первоначальный паттерн нейронного возбуждения в тех же самых группах нейронов.

Таким образом, память нельзя отнести к некоей одной области мозга – она распределена по многим, если не по всем, нейронным сетям, ибо каждая из них способна изменять свои синапсы в ответ на частые паттерны нейронной активности. Однако не все нейронные системы играют одинаковую роль. Несмотря на отсутствие единой и внятной терминологии, на сегодняшний день исследователи различают по крайней мере четыре вида памяти.

- Рабочая память: она хранит ментальные репрезентации в активной форме в течение нескольких секунд. Она существует главным образом за счет дружного срабатывания многих нейронов в теменной и префронтальной коре, поддерживающих нейроны в других,

периферийных областях¹⁰⁶. Именно рабочая память позволяет нам помнить номер телефона, пока мы вводим его в смартфон: определенные нейроны поддерживают друг друга и таким образом сохраняют информацию в активном состоянии. Этот тип памяти преимущественно основан на поддержании устойчивого паттерна активности; впрочем, недавно было обнаружено, что он, вероятно, включает в себя и кратковременные синаптические изменения¹⁰⁷, позволяющие нейронам ненадолго засыпать и быстро возвращаться в активное состояние. Как бы то ни было, рабочая память ограничена секундами: как только мы отвлекаемся на что-то другое, ансамбль активных нейронов распадается. Рабочая память – буфер мозга, предназначенный для хранения только самой актуальной, самой свежей информации.

- Эпизодическая память: гиппокамп – структура, расположенная в глубинах полушарий головного мозга под корой, – записывает события повседневной жизни. Нейроны гиппокампа, по-видимому, запоминают контекст каждого эпизода: они кодируют, где, когда, как и с кем все произошло. Сохранение событий осуществляется посредством синаптических изменений, благодаря которым мы можем вспомнить их позже. Знаменитый пациент Г. М.^[22], чьи гиппокампы в обоих полушариях были удалены в ходе хирургической операции, навсегда утратил способность запоминать: он жил в вечном настоящем, не имея возможности добавить ни единого нового воспоминания к своей ментальной биографии. Последние данные свидетельствуют о том, что гиппокамп задействован во всех видах быстрого научения. Если усвоенная информация уникальна, будь то некое событие или интересное открытие, нейроны гиппокампа приписывают ему определенную последовательность возбуждения¹⁰⁸.

- Семантическая память: воспоминания не остаются в гиппокампе навсегда. Ночью наш мозг воспроизводит их и перемещает в новое место в коре. Там они трансформируются в постоянное знание: мозг извлекает информацию из приобретенного опыта, обобщает ее и интегрирует в обширную библиотеку знаний о мире. Спустя несколько дней мы все еще помним имя президента, но не помним, где и когда мы впервые его услышали: из эпизодического воспоминание перешло в разряд семантического. То, что изначально было всего лишь единичным эпизодом, трансформировалось в стойкое знание, а его нейронный код переместился из гиппокампа в соответствующие корковые сети¹⁰⁹.

- Процедурная память: когда мы повторяем одно и то же действие снова и снова (завязываем шнурки, читаем стихотворение наизусть, считаем, жонглируем, играем на скрипке, катаемся на велосипеде), корковые и подкорковые нейроны подвергаются модификациям с тем, чтобы в будущем передавать информацию быстрее и эффективнее. В итоге паттерн нейронного возбуждения, лишенный любой пассивной активности, воспроизводится с точностью часового механизма. Это процедурная память – компактная, бессознательная запись нейронной активности, ассоциированной с привычными видами деятельности. В процедурной памяти гиппокамп не участвует: за счет регулярной практики воспоминания сохраняются в имплицитном пространстве памяти, в первую очередь включающем особые подкорковые структуры – базальные ганглии. Вот почему пациент Г. М. даже в отсутствие сознательной, эпизодической памяти, опосредованной гиппокампом, по-прежнему мог приобретать новые навыки. Исследователи даже научили его писать задом наперед, глядя на свою руку в зеркале. Поскольку Г. М. не помнил, как долго он тренировал этот навык раньше, он был просто ошеломлен, увидев, как хорошо давалось ему это новое «искусство»!

Истинные синапсы и ложные воспоминания

Сюжет незабываемого фильма «Вечное сияние чистого разума» (2004) французского режиссера Мишеля Гондри построен вокруг компании, которая специализируется на выборочном стирании воспоминаний. И правда, разве плохо, если бы мы могли каким-то образом удалять воспоминания, отравляющие нашу жизнь, – например, вызывающие посттравматический стресс у участников боевых действий? Или, наоборот, рисовать иллюзорные полотна ложных воспоминаний?

Нейробиологи так хорошо изучили нейронные сети, задействованные в памяти, что идея Мишеля Гондри, на самом деле, не такая уж фантастическая. Обе манипуляции уже были проведены на мышах командой другого лауреата Нобелевской премии, профессора Судзуми Тонегавы. Сначала ученые запускали мышь в комнату, где она получала несколько слабых

ударов электрическим током. Позже животное старательно избегало этого помещения; это означало, что данный неприятный эпизод был запечатлен в его памяти. Коллегам Тонегавы удалось даже визуализировать этот процесс. Используя сложный двухфотонный микроскоп, они смогли отследить, какие нейроны были активны в каждый момент времени. Как выяснилось, комната А, которая ассоциировалась с ударами током, и комната Б, где не происходило ничего плохого, вызывали активность в разных группах нейронов гиппокампа.

Затем исследователи решили проверить, можно ли изменить эти эпизодические воспоминания. Пока мышь физически находилась в комнате А, ученые снова подвергли ее воздействию слабых электрических разрядов, но на этот раз искусственно активировали популяцию нейронов, кодирующих комнату Б. Это искусственное обусловливание дало удивительный эффект: позже, когда мышь вернулась в комнату Б, она испугалась и замерла. Плохое воспоминание теперь было связано с комнатой Б, где ничего неприятного не случилось¹¹⁰. Иными словами, реактивации значимой группы нейронов было достаточно, чтобы пробудить воспоминание и связать его с новой информацией.

После этого команда Тонегавы превратила плохое воспоминание в хорошее. Можно ли стереть травматическое воспоминание? Да. Реактивируя нейроны, кодирующие комнату Б, в присутствии особой противоположного пола (беспронгрышный вариант), исследователи успешно стерли ассоциацию с ударами электрическим током. Теперь мыши отнюдь не избегали проклятой комнаты Б – напротив, они принимались лихорадочно исследовать ее, как будто искали половых партнеров¹¹¹.

Другая группа исследователей применила несколько иную стратегию: они активировали исходную группу нейронов и одновременно ослабляли синапсы, которые их связывали. На протяжении нескольких дней мышь не проявляла ни малейших воспоминаний о первоначальной травме¹¹².

Следуя той же логике, французский исследователь Карим Бенченан успешно внедрил новое воспоминание в мозг спящей мыши¹¹³. Всякий раз, когда животное засыпает, нейроны в его гиппокампе самопроизвольно реактивируют воспоминания о предыдущем дне – особенно о местах, где оно побывало (более подробно мы поговорим об этом явлении в главе 10). Решив воспользоваться этим обстоятельством, Бенченан подождал, когда мозг спящей мыши реактивирует нейроны, связанные с определенной локацией в клетке, а затем сделал ей инъекцию дофамина, нейротрансмиттера удовольствия. И – о чудо! – как только мышь проснулась, она со всех лап побежала к этому месту! Таким образом, изначально нейтральная локация за ночь приобрела совершенно иное значение – столь же притягательное, как сладость Прованса или место, где мы впервые влюбились.

Другие эксперименты на животных позволили ученым имитировать воздействие школьного обучения на мозг. Что происходит, когда обезьяна осваивает буквы, цифры или новый инструмент?¹¹⁴ Японский исследователь Ацуси Ирики показал: обезьяна может научиться пользоваться граблями и с их помощью доставать пищу, до которой нельзя дотянуться рукой. После нескольких тысяч попыток животное ни в чем не уступало опытному крупье в казино: ему требовалось всего несколько десятых долей секунды, чтобы сгрести угощение одним движением запястья. Обезьяна даже сообразила, как с помощью грабеля среднего размера притянуть к себе вторые, более длинные грабли и добраться до пищи, расположенной гораздо дальше от клетки! Данный тип научения – овладение инструментом – вызвал целый каскад изменений в мозге. Прежде всего увеличилось потребление энергии в передней теменной области – зоне, которую люди используют, чтобы контролировать движения рук, писать, хватать предметы, пользоваться молотком или плоскогубцами. Это сопровождалось экспрессией новых генов, усилением синаптических связей и активным ветвлением дендритных и аксонных деревьев. Все это привело к 23-процентному утолщению коры. Кардинальным изменениям подверглись целые пучки связей: аксоны нейронов, расположенных на достаточном удалении, на стыке с височной корой выросли на несколько миллиметров и захватили часть передней теменной области, которая ранее не имела контактов с этими клетками.

Изменения, перечисленные выше, – отличная иллюстрация проявлений нейропластичности во времени и пространстве. Повторим основные моменты. Итак, в нашем мозге активируется группа нейронов, кодирующих событие или понятие, которое мы хотим запомнить. Как же сохраняется эта информация? У нас есть синапс, микроскопическая точка контакта между двумя нейронами. Его сила увеличивается, когда два нейрона возбуждаются в

короткой последовательности друг за другом – это знаменитое правило Хебба: нейроны, которые срабатывают вместе, связываются друг с другом. Синапс, ставший сильнее, подобен фабрике, которая увеличивает свою производительность: он набирает больше нейротрансмиттеров на пресинаптической стороне и больше рецепторных молекул на постсинаптической стороне. Разумеется, чтобы вместить их все, он увеличивается в размерах.

По мере того как нейрон учится, меняется и его форма. В том месте дендрита, где располагается синапс, образуется грибовидная структура под названием «дендритный шипик». При необходимости появляется второй синапс, дублирующий первый. Другие синапсы, которые образует тот же нейрон, тоже усиливаются¹¹⁵.

Таким образом, при пролонгированном научении меняется сама анатомия мозга. Благодаря последним достижениям в микроскопии – в частности, двухфотонным микроскопам, основанным на лазерах и квантовой физике, – можно непосредственно увидеть, как, подобно деревьям весной, растут синаптические и аксональные терминалы. В совокупности дендритные и аксональные изменения могут быть весьма существенными – порядка нескольких миллиметров. В этом случае их можно обнаружить с помощью МРТ. Овладение навыками игры на музыкальном инструменте¹¹⁶, чтения¹¹⁷, жонглирования¹¹⁸, даже вождения такси в большом городе¹¹⁹ приводит к заметному утолщению коры и усилению связей, соединяющих ее различные области: «пропускная способность» магистралей мозга тем выше, чем чаще мы ими пользуемся.

Синапсы – это лучший пример научения, но отнюдь не единственный механизм изменений в мозге. Когда мы учимся, формирование новых синапсов заставляет нейроны отращивать дополнительные ветви как на аксонах, так и на дендритах. На приличном удалении от синапса аксоны окружают себя специальной оболочкой – миелином. Миелин похож на клейкую ленту, которая используется для изоляции электрических проводов. Чем больше используется аксон, тем больше слоев содержит эта оболочка и тем выше изоляция, что позволяет передавать информацию с большей скоростью.

Помимо нейронов, в игре под названием «научение» участвуют и другие клетки. В процессе научения трансформируется вся окружающая среда, включая глиальные клетки, которые питают и лечат нейроны. Меняется даже сеть вен и артерий, снабжающих их кислородом, глюкозой и питательными веществами. В конце концов модификациям подвергаются не только сами связи, но и поддерживающая их инфраструктура.

Некоторые исследователи не согласны с тем, что синапсы суть необходимые акторы всякого научения. Последние данные показывают, что клетки Пуркинье – особые нейроны, локализованные в мозжечке, – могут запоминать временные интервалы и что синапсы не играют в этом процессе никакой роли: данное явление, по-видимому, носит сугубо внутриклеточный характер¹²⁰. Вполне возможно, что измерение времени, на котором специализируется мозжечок, сохраняется в памяти с помощью другого механизма, приобретенного нами в ходе эволюции и не основанного на синапсах. Предполагается, что каждый мозжечковый нейрон абсолютно самостоятельно может хранить несколько временных интервалов – вероятно, благодаря стабильным химическим изменениям в своей ДНК.

В рамках другого направления исследований ученые пытаются выяснить, какую роль играют синаптические и прочие изменения в наиболее сложных типах научения, на которые только способен человеческий мозг. Прежде всего речь идет, разумеется, о научении, основанном на «языке мышления» и быстрой рекомбинации существующих понятий. Как мы уже видели, традиционные модели искусственных нейронных сетей обеспечивают более или менее правдоподобное объяснение того, как миллионы изменяющихся синапсов позволяют нам распознавать числа, объекты или лица. Однако до сих пор не существует по-настоящему удовлетворительной модели того, каким именно образом синаптические изменения содействуют овладению речью или усвоению математических понятий. Переход от синапсов к символическим правилам, которые мы изучаем на уроках математики, до сих пор остается загадкой. Посему я призываю всех мыслить открыто: пока мы еще очень далеки от полного понимания биологических кодов, с помощью которых наш мозг хранит воспоминания.

Питание как ключевой элемент научения

Несомненно одно: когда мы учимся, в нашем мозге происходят масштабные биологические трансформации. Меняются не только каркасы из дендритов и аксонов всех задействованных нейронов, но и окружающие их глиальные клетки. Все эти преобразования требуют времени. Каждый учебный опыт влечет за собой целый каскад биологических изменений, которые могут занять несколько дней. Экспрессия многочисленных генов, отвечающих за пластичность, заставляет клетки вырабатывать белки и мембраны, необходимые для образования новых синапсов, дендритов и аксонов. Этот процесс чрезвычайно энергоемкий: мозг маленького ребенка потребляет до 50 процентов энергетического баланса организма. Глюкоза, кислород, витамины, железо, йод, жирные кислоты – без этих и многих других питательных веществ рост мозга невозможен. Мозг питается не только интеллектуальной стимуляцией. Чтобы создавать и разрушать несколько миллионов синапсов в секунду, ему требуется сбалансированное питание, кислород и физические упражнения¹²¹.

Потребность развивающегося мозга в правильном питании иллюстрируется одной печальной историей, которая произошла в Израиле в ноябре 2003 года. Всего за одну ночь в детские больницы по всей стране поступили десятки младенцев, заболевших неизвестной болезнью¹²². У всех наблюдались тяжелые неврологические симптомы: вялость, рвота, нарушения зрения и активности. Некоторые впали в кому; двое погибли. Началась гонка со временем: что это за новая болезнь и чем вызвано ее внезапное развитие?

В конце концов выяснилось, что всех больных детей кормили из бутылочки одним и тем же сухим соевым молоком. Анализ его формулы подтвердил худшие опасения. Согласно этикетке, молоко должно было содержать 385 миллиграммов тиамин, более известного как витамин В₁. На деле его там не было вообще. Производитель признался, что в начале 2003 года состав смеси изменился: по экономическим соображениям в молоко перестали добавлять тиамин. Этот витамин, однако, является важнейшим питательным веществом для мозга. Поскольку в организме тиамин не накапливается, его отсутствие в рационе быстро приводит к выраженному дефициту.

Неврологи уже знали, что дефицит тиамин у взрослых вызывает тяжелое неврологическое расстройство, синдром Вернике—Корсакова, чаще всего поражающий сильно пьющих людей. В острой фазе возможно развитие энцефалопатии Вернике, которая в некоторых случаях заканчивается летальным исходом. Спутанность сознания, расстройство движений глаз, неспособность координировать движения и недостаточная бдительность, иногда приводящие к коме и смерти... симптомы болезни во всем сходились с симптомами, которые наблюдались у младенцев в Израиле.

Окончательным доказательством послужили результаты терапевтического вмешательства. Как только дети снова стали получать витамин В₁, их состояние улучшилось, уже через несколько дней они смогли вернуться домой. По разным оценкам, от шестисот до тысячи израильских младенцев испытывали недостаток тиамин в течение двух или трех недель. Восстановление сбалансированного питания спасло им жизнь. Однако спустя годы, в возрасте шести-семи лет, почти у всех проявились серьезные проблемы с речью. Израильский психолог Наама Фридман, обследовавшая около шестидесяти таких детей, обнаружила, что для большинства были характерны нарушения в понимании и образовании устной и письменной речи. Наиболее выраженные аномалии наблюдались в сфере грамматики: прочитав или услышав предложение, дети с трудом сообразили, кто что с кем делает. Даже такая простая задача, как озаглавливание картинки – например, изображения овцы, – вызывала определенные сложности. Тем не менее концептуальная обработка казалась интактной: например, клубок шерсти дети правильно ассоциировали с овцой, а не со львом. В норме были и все остальные показатели, включая интеллект.

Это происшествие – лучшее свидетельство того, что и у нейропластичности есть свои границы. Овладение речью, очевидно, основано на невероятной гибкости младенческого мозга. Любой малыш способен выучить любой язык мира, от тонов китайского до щелчков банту: его мозг соответствующим образом меняется в ответ на погружение в определенную языковую среду. К несчастью, эта пластичность не бесконечна и не волшебна: это сугубо материальный процесс, требующий определенных питательных и энергетических затрат. Даже несколько недель депривации могут привести к перманентным нарушениям. Поскольку организация мозга носит модульный характер, нарушения могут быть ограничены одной когнитивной областью, такой как грамматика или словарный запас. Педиатрическая

литература полна подобных примеров. Я мог бы упомянуть, например, фетальный алкогольный синдром, причиной которого является воздействие на плод алкоголя. Алкоголь – это тератоген, вещество, вызывающее пороки развития тела и мозга; для формирующейся нервной системы это настоящий яд, которого следует избегать на протяжении всей беременности. Чтобы дендритные деревья росли, сад мозга должен быть обеспечен всеми необходимыми ему питательными веществами.

Возможности и ограничения синаптической пластичности

Но насколько пластичен хорошо питающийся мозг? Может ли он полностью перестроиться, кардинально изменить свою анатомию под влиянием опыта? Ответ – нет. Пластичность – это приспособительная переменная. Она имеет фундаментальное значение для научения, но не может выйти за рамки генетических ограничений, которые делают нас теми, кто мы есть, – совокупностью фиксированного генома и уникальных переживаний.

Пришло время рассказать вам о Нико, молодом художнике, с чьим творчеством мы уже познакомились во введении (см. цветную иллюстрацию 1). Нико пишет свои великолепные картины, используя только одно полушарие – левое. В возрасте трех лет и семи месяцев он перенес хирургическую операцию под названием «гемисферэктомия»^[23], чтобы положить конец мучительной эпилепсии.

Благодаря поддержке семьи, врачей и исследователя Гарвардской высшей школы педагогических наук Антонио Баттро Нико смог посещать начальную школу в Буэнос-Айресе, а затем школу в Мадриде, в которой он проучился до восемнадцати лет. В настоящее время его устная и письменная речь, память и пространственные навыки безупречны. Он даже получил диплом об окончании университета в сфере информационных технологий. А главное – у него есть потрясающий талант к рисованию и живописи.

Является ли это хорошим примером пластичности мозга? Несомненно: левое полушарие Нико освоило многие функции, которые у нормального человека традиционно ассоциируются с правым полушарием. Например, Нико может оценить всю картину в целом и скопировать пространственную компоновку рисунка; он понимает иронию, чутко улавливает интонации и может угадать мысли людей, с которыми разговаривает. Если бы подобной операции подвергся взрослый человек, эти функции, вероятно, были бы утрачены навсегда.

Однако пластичность мозга маленького Нико преимущественно ограничивалась теми же самыми нейронными сетями, которые имеются у всех других детей. Обследовав Нико с помощью целой батареи тестов, мы обнаружили, что он сумел втиснуть все свои приобретенные таланты в неповрежденное левое полушарие, не нарушив его обычной организации. Все традиционно правосторонние функции переместились в левое полушарие симметрично их обычным локациям! Например, корковые нейроны, которые реагируют на лица и обычно располагаются в правой височной доле, у Нико были расположены в том же самом месте, только в левой височной доле (у здоровых детей этот участок коры тоже реагирует на лица, но очень слабо). Таким образом, хотя мозг Нико перестроился, он сохранил существовавшую ранее организацию, общую для всех людей. Основные пучки волокон, которые формируются в период внутриутробного развития и проходят через мозг каждого ребенка, не позволили научению выйти за узкие рамки универсальной карты коры.

Возможности и пределы пластичности мозга особенно очевидны на примере зрительных способностей. Неудивительно, что Нико – гемианоптик. Фактически его зрение расщеплено на две части: в правой половине он видит идеально (обоими глазами), а в левой полностью слеп. Когда Нико смотрит на некий предмет, правая сторона кажется абсолютно нормальной, а левая остается невидимой; чтобы ее увидеть, Нико приходится смещать взгляд или поворачивать голову. Дело в том, что из-за перекреста зрительных путей сигналы с левой половины зрительного поля, которые обычно попадают в правое полушарие, у Нико попадают в пустоту и не могут быть обработаны. Даже за двадцать лет зрительного опыта мозг Нико так и не сумел компенсировать эту фундаментальную проблему. Очевидно, к потере зрения в левой части зрительного поля привели сразу два фактора: скромная пластичность зрительных связей и ранняя остановка развития этой части мозга.

Теперь позвольте мне рассказать о другом юном пациенте – десятилетней девочке, которую мы знаем только по ее инициалам, А. Г.¹²³. У этого ребенка, как и у Нико, есть

только левое полушарие: из-за врожденного дефекта правое прекратило развиваться на седьмой неделе беременности. Другими словами, почти всю свою жизнь А. Г. прожила без правого полушария. Ранняя пластичность коренным образом изменила ее мозг? Нет, но в отличие от Нико А. Г. способна различать слабый свет, форму и движение в левой части зрительного поля, которая должна проецироваться на отсутствующее правое полушарие. Ее зрение далеко от идеального, однако она действительно улавливает свет и движение в области, близкой к центру зрительного поля. Томография головного мозга показывает, что ее зрительные области подверглись частичной перестройке (см. цветную иллюстрацию 11). Так, в задней части неповрежденного левого полушария, в затылочной коре, удалось обнаружить совершенно нормальную карту правой части мира, а также небольшие аномальные участки, которые реагируют на левую часть. По-видимому, аксоны из той половины сетчатки, которая должна была полностью ослепнуть, вторглись в другую сторону мозга. Это крайнее проявление пренатальной пластичности, но даже в этом случае реорганизация лишь частична и недостаточна для восстановления нормального зрения. Поскольку зрительная система подчинена жестким генетическим ограничениям, пластичность действует только в ее узких рамках.

Но как далеко можно отодвинуть эти генетические границы? В одном эксперименте нейробиологу Массачусетского технологического института Мриганке Суру удалось преобразовать слуховую кору хорьков в зрительную¹²⁴. Для этого во время небольшого хирургического вмешательства он повреждал слуховые пути плода, которые ведут от улитки к слуховой коре. Такие хорьки неизбежно теряли слух, однако затем происходила любопытная переориентация и в отключенный слуховой контур вторгались зрительные волокна. В итоге целая область коры, которая должна была отвечать за слух, начала реагировать на зрительные образы. Как и обычная зрительная кора, она содержала целую карту нейронов, чувствительных к свету и ориентированным прямым. Синапсы приспособились к этой новой конфигурации и стали кодировать корреляции между нейронами, которые изначально предназначались для слуха, но были перепрофилированы в зрительные процессоры.

Должны ли мы на этом основании заключить, что церебральная пластичность ведет к масштабным перестройкам и что именно опыт «организует кору», как провозгласили бы самые ярые защитники теории «чистого листа»?¹²⁵ Как ни странно, Сур делает прямо противоположный вывод. Он настаивает, что это патологическая ситуация и что реорганизация далека от совершенства: зрительные карты в слуховой коре дифференцированы не так хорошо, как должны быть. Зрительная кора генетически приспособлена для поддержки зрения. В ходе нормального развития все области коры специализируются очень рано, под контролем многочисленных генов. Направление роста аксонов предопределено химически, согласно протокартам в развивающемся мозге. Только в конце пути они подвергаются растущему воздействию входящих сигналов и могут адаптироваться к ним. Нейрональный гобелен фиксирован – модификациям подвержены лишь небольшие, но важные стежки.

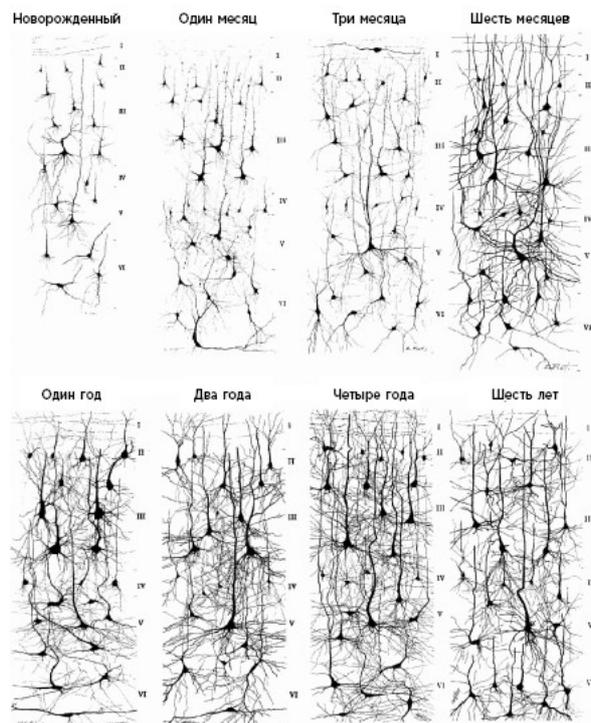
Также необходимо понимать, что не всякое изменение синапсов – даже изменение, вызванное нейронной активностью, – есть результат влияния окружающей среды. Мозг может использовать синаптическую пластичность и для *самоорганизации*. На начальных стадиях он генерирует паттерны активности изнутри, в отсутствие каких-либо внешних воздействий. Эти паттерны активности в сочетании с синаптической пластичностью затем используются для формирования нервных связей. Во время внутриутробного развития никакой сенсорной информации не поступает, однако мозг, мышцы и даже сетчатка глаза уже проявляют спонтанную активность (именно поэтому плод шевелится). Нейроны – возбудимые клетки: они могут срабатывать самопроизвольно, а их потенциалы действия самоорганизуются в мощные волны. Так, в сетчатке плода регулярно зарождаются случайные волны спайков, которые, хоть и не несут никакой визуальной информации в строгом смысле этого слова, помогают организовать зрительные карты коры¹²⁶. Следовательно, на ранних этапах развития синаптическая пластичность не требует никакого взаимодействия с внешним миром. Только во время третьего триместра беременности граница между природой (наследственностью) и окружающей средой постепенно стирается: именно в это время мозг, который уже достаточно хорошо сформирован, начинает приспосабливаться как к внутреннему, так и к внешнему миру.

Даже после рождения нейроны продолжают генерировать случайные импульсы, не связанные с сенсорными сигналами. Очень медленно эта эндогенная активность развивается под влиянием органов чувств. Лучше всего данный процесс можно описать в рамках теоретической базы «байесовского мозга»¹²⁷. Первоначальная эндогенная активность представляет собой то, что статистики называют *априорной вероятностью*: ожидания мозга, его эволюционные предположения, предшествующие любому взаимодействию с окружающей средой. Позже эти предположения корректируются под действием сигналов окружающей среды, и через несколько месяцев жизни спонтанная нейронная активность начинает напоминать то, что статистики называют *апостериорной вероятностью*: исходное распределение вероятностей изменилось, чтобы точнее отражать статистику реального мира. В ходе развития мозга внутренние модели, запечатленные в наших нейронных сетях, собирают статистику по своим сенсорным входам и совершенствуются. Конечным результатом является компромисс, выбор наилучшей внутренней модели из тех, что доступны в рамках изначальной организации.

Что такое сензитивный период?

Выше мы убедились, что пластичность мозга, с одной стороны, творит чудеса, а с другой – носит весьма ограниченный характер. Все связи могут и должны меняться по мере того, как мы живем, взрослеем и учимся. Тем не менее главные из них формируются еще до рождения и остаются, по существу, одинаковыми у всех нас. Все, чему мы учимся, является результатом незначительных корректировок на уровне микросетей, масштаб которых редко превышает несколько миллиметров. Несмотря на то что в процессе созревания нейронов их концевые ветви наращивают новые терминалы, образуя контакты с другими клетками, эти связи остаются в пределах, заданных генетически. В ответ на воздействие окружающей среды нейронные пути могут изменять свою локальную коннективность, силу и миелинизацию, окружая себя изолирующей оболочкой, которая облегчает передачу информации, но не могут переориентироваться по своему желанию.

Помимо пространственного ограничения на связность между отдаленными участками, существует и временное ограничение: во многих областях мозга пластичность максимальна только в течение определенного интервала, так называемого сензитивного периода. Сензитивный период начинается в раннем детстве и обычно занимает несколько лет. Точные сроки варьируются: сенсорные области достигают максимальной пластичности примерно в возрасте года или двух лет, в то время как области более высокого порядка, такие как префронтальная кора, – в детском или даже раннем подростковом возрасте. Несомненно одно: с возрастом пластичность уменьшается; в результате научение хоть и не останавливается полностью, но становится заметно труднее¹²⁸.



В течение первых двух лет жизни нейронные деревья растут очень быстро, образуя густые заросли. В мозге двухлетнего ребенка количество синапсов почти вдвое больше, чем у взрослого. В процессе развития дендритные деревья подвергаются регулярной обрезке: полезные синапсы сохраняются и множатся, а ненужные ликвидируются.

Причина, по которой я утверждаю, что маленькие дети – это подлинные самообучающиеся машины, заключается в том, что в первые годы жизни их мозгу свойственна невероятная синаптическая пластичность. Дендриты пирамидальных нейронов разрастаются с бешеной скоростью. При рождении кора ребенка напоминает лес после урагана – пустошь с торчащими кое-где голыми стволами. Однако уже через шесть месяцев от нее не остается и следа: нейронные связи и ответвления множатся, пока не образуют настоящие джунгли¹²⁹.

Такая прогрессирующая комплексификация нейронных деревьев может свидетельствовать о том, что окружающая среда накладывает свой отпечаток на мозг и заставляет его расти по мере накопления данных. В реальности, однако, все гораздо сложнее. В незрелом мозге синапсы не возникают прямо пропорционально научению. Они скорее создаются в чрезмерном количестве; роль окружающей среды состоит в том, чтобы эти синапсы сохранить или уничтожить – в зависимости от их полезности для организма. В раннем детстве плотность синапсов вдвое больше, чем во взрослом возрасте. В каждой области коры за непрерывными волнами перепроизводства следует избирательная ликвидация бесполезных синапсов или, наоборот, приумножение тех синапсов и дендритных и аксональных ветвей, которые доказали свою ценность. Вспомните об этом в следующий раз, когда увидите маленького ребенка: каждую секунду в его мозге создается или уничтожается несколько миллионов синапсов. Эта бурная деятельность в значительной степени объясняет существование сензитивных периодов. В раннем детстве дендритные и синаптические системы еще очень податливы; чем старше становится мозг, тем эта гибкость ниже. В зрелом мозге научение сводится к маргинальным изменениям.

Примечательно, что всплески синаптического перепроизводства и прунинга происходят не везде одновременно¹³⁰. Первичная зрительная кора, как и другие сенсорные области, созревает гораздо быстрее, чем области более высокого уровня. Организационный принцип, по-видимому, заключается в быстрой стабилизации входных сигналов путем фиксации корковой организации в низших сенсорных областях. Области, занимающие более высокие уровни в корковой иерархии – например, префронтальная кора, – сохраняют способность к

трансформации намного дольше и стабилизируются последними: они продолжают меняться в подростковом возрасте и даже после него. У человека пик синаптического перепроизводства в зрительной коре заканчивается примерно в два года, в слуховой коре – в три-четыре года, в префронтальной коре – между пятью и десятью годами¹³¹. Миелинизация, образование изолирующей оболочки вокруг аксонов, происходит по той же схеме¹³². Первыми миелинизируются нейроны сенсорных областей. В результате обработка зрительной информации резко ускоряется: задержка передачи информации от сетчатки к зрительным областям снижается с четверти до десятой доли секунды в первые несколько недель жизни¹³³. Гораздо медленнее происходит изоляция пучков волокон, которые проецируются на лобную кору, зону абстрактного мышления, внимания и планирования. В течение многих лет маленькие дети обладают гибридным мозгом: их сенсорные и моторные нейроны достаточно зрелы, в то время как высшие области продолжают работать с медленной скоростью, характерной для немиелинизированных нейронов. По этой причине в течение первого года жизни им требуется в четыре раза больше времени, чем взрослым, чтобы осознать базовую информацию – например, присутствие лица¹³⁴.

В такт с последовательными волнами синаптического перепроизводства и миелинизации начинаются и заканчиваются сензитивные периоды для научения. Низшие сенсорные области одними из первых теряют способность к научению. Наиболее изученным примером как у людей, так и у животных является бинокулярное зрение¹³⁵. Чтобы вычислить глубину, зрительная система объединяет информацию с обоих глаз. Однако такое «бинокулярное слияние» происходит только в том случае, если зрительная кора получает качественные сигналы от обоих глаз в течение четко определенного сензитивного периода, который длится несколько месяцев у кошек и несколько лет у людей. Если в течение этого периода один глаз остается закрытым, плохо видит или смещен из-за сильного косоглазия, сеть корковых нейронов, отвечающая за слияние информации, не формируется, и дефект приобретает перманентный характер. Вот почему «амблиопию», или «ленивый глаз», необходимо исправить в первые годы жизни, в идеале до трехлетнего возраста.

Другой сензитивный период позволяет нам овладеть звуками родного языка. Здесь младенцы чемпионы: при рождении они различают все фонемы всех языков. Где бы они ни родились и каков бы ни был их генетический фон, все, что им нужно, – это погрузиться в языковую ванну (одноязычную, двуязычную или даже трехязычную), и через несколько месяцев их слух сам настроится на фонологию языка, на котором говорят все вокруг. С возрастом мы теряем эту замечательную способность. Как мы видели, японцы могут прожить всю жизнь в англоговорящей стране, но так и не научиться отличать звук [р] от звука [л], вечно путая *красть* с *класть*, *рожки* с *ложками*, *ром* с *ломом*. Правда, британцы и американцы ничем не лучше: будучи носителями английского языка, они никогда не смогут различить ни зубную и ретрофлексную версии согласного звука [т] (хотя для любого носителя хинди это раз плюнуть), ни короткие и длинные гласные финского и японского, ни четыре вида тонов китайского.

Исследования показывают, что мы теряем эту способность к концу первого года жизни¹³⁶. В младенчестве мы бессознательно собираем статистику о том, что слышим, и наш мозг приспособляется к распределению фонем, используемых окружающими. Примерно в двенадцать месяцев этот процесс затухает, и что-то в нашем мозге «ломается»: мы теряем способность учиться. За исключением чрезвычайных обстоятельств, мы больше никогда не сможем выдать себя за носителей японского, финского или хинди – отныне наша фонология (практически) не подлежит изменению. Взрослому человеку требуется огромное усилие, чтобы вновь обрести способность различать звуки на иностранном языке. Только при интенсивной практике и выраженном утративании различий между [р] и [л] взрослый японец может научиться слышать разницу между этими звуками, а затем, со временем, частично восстановить способность их различать¹³⁷.

Вот почему ученые говорят о сензитивном, а не о критическом периоде: способность к научению уменьшается, но никогда не исчезает полностью. У взрослых людей остаточная способность усваивать иностранные фонемы существенно варьируется. Для большинства из нас попытка правильно говорить на иностранном языке в зрелом возрасте – задача не из легких. Именно поэтому большинство французов в США говорят, как инспектор Клузо из «Розовой пантеры» (*Verre iz ze téléfawn?*). Примечательно, однако, что некоторые люди сохраняют способность осваивать фонологию иностранных языков; частичным предиктором этой компетенции может быть размер, форма и количество связей их слуховой коры¹³⁸. В

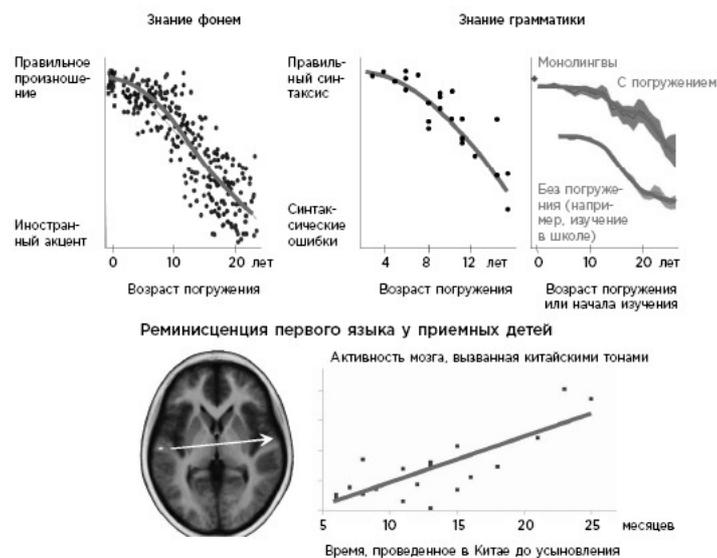
мозге таких счастливицков, по-видимому, стабилизирован более гибкий набор связей – но это скорее исключение, чем правило.

Сензитивный период для овладения фонологией иностранного языка быстро заканчивается: ребенок двух-трех лет гораздо менее компетентен, чем малыш, которому всего несколько месяцев. Более высокие уровни речевой обработки, такие как освоение грамматики, сохраняют гибкость чуть дольше, вплоть до периода полового созревания. Как показывают исследования, дети, прибывшие в чужую страну в качестве мигрантов или усыновленных, могут прекрасно говорить на новом языке, однако небольшой иностранный акцент и периодические синтаксические ошибки часто выдают их истинное происхождение. И то и другое практически незаметно у детей, которые въехали в страну в возрасте трех-четырёх лет, но сильно выражено у молодых людей, которые иммигрировали в подростковом или зрелом возрасте¹³⁹.

Авторы статьи, недавно опубликованной в одном научном журнале, собрали данные от миллионов людей, изучающих второй язык в интернете, и использовали их для моделирования кривой изучения языка, характерной для среднестатистического человека¹⁴⁰. Полученные результаты свидетельствуют о том, что способности к освоению грамматики медленно снижаются на протяжении всего детства, а после семнадцати лет резко падают. Поскольку научение требует времени, исследователи рекомендуют начинать изучение второго языка до десяти лет, а также подчеркивают большую эффективность погружения в новую языковую среду по сравнению с изучением иностранного языка в классе или по телевизору. Последнее неудивительно: вы гораздо быстрее добьетесь успеха, если вам придется говорить на новом языке в рамках реальных социальных взаимодействий (например, чтобы пообедать или сесть в автобус). Опять же, чем раньше, тем лучше: пластичность мозга, обеспечивающая освоение грамматики, по-видимому, резко снижается в конце полового созревания (хотя дело не только в пластичности; другие факторы, связанные с мотивацией и социализацией, вероятно, тоже играют свою роль).

До сих пор мы рассматривали освоение именно второго языка. Обратите внимание, что эта компетентность снижается относительно медленно, в течение десятилетия или около того, и никогда не падает до нуля. Возможно, все дело в том, что она реализуется мозгом, который уже освоил один язык. Но что произойдет, если в первые годы жизни лишить ребенка всякого контакта с каким-либо языком вообще? Легенда гласит, что фараон Псамметих I был первым, кто задался этим вопросом. Он оставил двух детей на попечение пастуха и строго-настроено запретил ему с ними разговаривать – и все же оба ребенка в конце концов заговорили... по-фригийски! Этот «эксперимент» предположительно был воспроизведен императором Фридрихом II в XIII веке, Яковом IV, королем Шотландии, в XV веке и Джалалудином Мухаммадом Акбаром, главой империи Великих Моголов, в XVI веке, причем некоторые из этих детей умерли. (Лакановские психоаналитики сходят с ума по этой истории.)

Прогрессирующая утрата способностей к овладению вторым языком



Способность к овладению иностранным языком резко снижается с возрастом, что свидетельствует о закрытии сензитивного периода, во время которого пластичность мозга достигает максимума. Чем позже вы начнете учить язык, тем ниже ваши шансы говорить на нем без акцента и грамматических ошибок (см. верхний рисунок). И наоборот: чем дольше приемные дети находятся в своей стране перед отъездом, тем дольше их мозг сохраняет спящий, бессознательный след родного языка (см. нижний рисунок).

Увы, в подобных баснях нет никакой нужды, ибо такие ситуации довольно регулярно возникают во всех странах мира: глухие дети рождаются везде. Если им не помочь, они навсегда останутся пленниками молчания. Сегодня мы знаем, как важно уже на первом году жизни обеспечить им необходимую речевую стимуляцию. Это может быть либо язык жестов, который представляется наиболее естественным (жестовые языки – это реальные языки, и дети, которые на них говорят, развиваются вполне нормально), либо обычный язык, если ребенку установлен кохлеарный имплантат, частично восстанавливающий слух. Опять-таки, как показывают исследования, действовать необходимо быстро¹⁴¹: у детей, которым ставят имплантаты позже восьми месяцев, наблюдаются перманентные дефициты в области синтаксиса. В частности, они плохо понимают предложения, в которых некоторые элементы переставлены местами. Это явление получило название «синтаксического движения». В предложении «Покажи мне девочку, которую расчесывает бабушка» не всем детям очевидно, что первое существительное «девочка» на самом деле является объектом глагола «расчесывает», а не его субъектом. Дети, получившие кохлеарный имплантат в возрасте старше одного или двух лет, не понимают такие предложения и не могут выбрать между картинкой, на которой бабушка расчесывает волосы девочки, и картинкой, на которой девочка расчесывает волосы бабушки.

Судя по всему, раннее детство – важная фаза для развития синтаксического движения: в отсутствие каких-либо лингвистических взаимодействий пластичность мозга для этого аспекта синтаксиса начинает снижаться уже к концу первого года жизни. Вспомните малышей, чуть не умерших в Израиле в 2003 году: нескольких недель тиаминовой депривации оказалось достаточно, чтобы они навсегда утратили чувство синтаксиса. Аналогичные результаты получены в исследованиях, посвященных детям-маугли и детям, подвергшимся жестокому обращению. В числе первых прежде всего следует упомянуть знаменитого Виктора из Аверона (ок. 1788–1828), в числе вторых – маленькую американскую девочку Джини, прожившую в кладовке более тринадцати лет. Как только Виктор и Джини вернулись к цивилизации, они начали говорить и даже приобрели некоторый словарный запас, однако в совершенстве овладеть грамматикой им так и не удалось.

Таким образом, изучение языка – прекрасный пример сензитивных периодов у человека, причем как для фонологии, так и для грамматики. Кроме того, это отличная иллюстрация

модульной организации мозга: в то время как способности к овладению грамматикой и звуками языка заметно снижаются, другие функции – например, способность заучивать новые слова и их значения – остаются сохранными на протяжении всей жизни. Именно эта остаточная пластичность позволяет нам в любом возрасте запоминать значения новых слов (*факс, iPad, мем, гик*) и юмористических неологизмов (*простыяло* – летнее одеяло из простыни, *хвастограммить* – хвастаться красивой жизнью в социальных сетях, *Абсурдистан* – страна, в которой происходит что-то нелепое или несурзное). К счастью, что касается расширения словарного запаса, взрослый мозг продолжает демонстрировать определенный уровень пластичности на протяжении всей жизни, хотя биологическая причина, по которой это происходит, в настоящее время неизвестна.

Приемные дети и совы-очкарики

Почему синаптическая пластичность снижается? Изучение биологических механизмов открытия и закрытия сензитивных периодов является одним из основных направлений исследования в современной нейробиологии¹⁴². Закрытие сензитивного периода, по-видимому, тесно связано с балансом между возбуждением и торможением. У детей возбуждающие нейроны созревают быстро, а тормозящие – медленнее. Некоторые нейроны, содержащие особый белок парвальбумин, постепенно окружают себя твердой матрицей – так называемой перинеурональной сетью. По мере увеличения ее плотности синапсы перестают формироваться и теряют подвижность, в результате чего никаких изменений в соответствующих нейронных сетях уже не происходит. Если бы мы могли освободить нейроны от этой смиренной рубашки, например, с помощью флуоксетина (более известного как Прозак), синаптическую пластичность, вероятно, удалось бы восстановить. Предполагается, что это может помочь в лечении инсульта, жертвам которого приходится заново учиться утраченным навыкам.

Немаловажную роль в закрытии сензитивного периода играют и другие факторы. Например, белок под названием *Lynx1* нейтрализует действие ацетилхолина. В итоге ацетилхолин, который обычно сигнализирует о событиях, представляющих интерес, и усиливает синаптическую пластичность, теряет свое влияние на сети зрелых нейронов. Некоторые исследователи пытались восстановить пластичность, воздействуя на *Lynx1* либо генетически, либо фармакологически, с помощью механизмов ацетилхолина, и добились весьма многообещающих успехов в экспериментах на животных.

Другой способ восстановить пластичность состоит в деполяризации нейронов и их приближении к порогу возбуждения с помощью электрического тока¹⁴³. В результате возбудимая сеть легче активируется и легче поддается модификациям. Эта новая терапия – источник больших надежд для пациентов с тяжелой депрессией: иногда слабых разрядов тока, подаваемых через кожу головы, оказывается достаточно, чтобы вернуть их на правильный путь.

Но почему нервная система вообще ограничивает пластичность? Почему после завершения сензитивного периода дальнейшие изменения в системах мозга становятся невозможны? В этом должен быть некий эволюционный смысл. Моделирование нейронных сетей показывает, что нейроны низших уровней зрительной иерархии быстро приобретают простые и воспроизводимые рецептивные поля – например, детекторы контура. Вполне вероятно, что дальнейшее их обновление и совершенствование бесполезно: этот тип детектора и так близок к оптимальному. Кроме того, изменение организации низших сенсорных областей – фундамента, на котором зиждется все восприятие, – может привести к хаосу в областях более высокого уровня. С этой точки зрения спустя несколько месяцев разумно оставить эти сенсорные нейроны в покое. Возможно, именно поэтому эволюция обеспечила нас механизмами, блокирующими дальнейшие изменения в сенсорных областях на более ранней стадии развития, чем в высших ассоциативных областях.

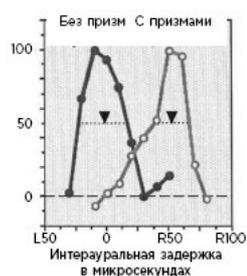
Хорошая новость заключается в следующем: поскольку со временем наши нейронные сети «застывают», стабильный, бессознательный синаптический след того, что мы усвоили в детстве, сохраняется на всю жизнь. Даже если позже эти ранние приобретения устаревают (например, за счет новых знаний), они навечно остаются запечатленными в самой ткани головного мозга. Замечательный пример – дети, которым приходится учить второй родной язык. Во второй половине XX века Корея была одной из стран, в которых массово прибегали к международному усыновлению. В течение сорока лет (с 1958 года) было усыновлено почти

180 тысяч корейских детей, подавляющее большинство которых (около 130 тысяч) попали в другие страны (более 10 тысяч – во Францию). В парижском исследовательском центре мы с Кристофом Паллье обследовали двадцать из них (уже во взрослом возрасте). Прибыв во Францию в возрасте от пяти до девяти лет, наши испытуемые практически не помнили родной страны (за исключением нескольких обонятельных воспоминаний, главным образом связанных с запахами пищи). Сканирование показало, что их мозг ведет себя так же, как мозг ребенка, родившегося во Франции¹⁴⁴: речевые области в левом полушарии активно реагировали на французские предложения и совсем не реагировали на корейские (во всяком случае, не больше, чем на любой другой неизвестный язык, скажем, японский). Казалось, что на лексическом и синтаксическом уровнях новый язык полностью вытеснил старый.

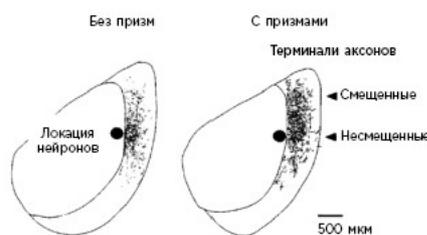
И все же... с помощью более совершенного подхода другая группа исследователей обнаружила, что усыновленные дети все еще хранят – в самой глубине своего кортекса – дремлющий след звуковых паттернов родного языка¹⁴⁵. В эксперименте приняли участие дети в возрасте от девяти до семнадцати лет, которые прожили в Китае всего один год, а затем попали в Канаду. Ученые поставили перед ними трудную задачу: различить тоны китайского языка. Томография головного мозга показала, что если коренные канадцы, незнакомые с китайским языком, не воспринимали эти звуки как речь и обрабатывали их как мелодию в правом полушарии, то китайско-канадские приемные дети, как и коренные китайцы, обрабатывали их в фонологической области левого полушария, так называемой *planum temporale*, или височной плоскости. Судя по всему, эта система нейронов «запоминает» родной язык в первый год жизни и никогда полностью не меняется.



Нейронный ответ



Нейронные связи



Ранний опыт может оказать сильнейшее влияние на формирование нервных связей в нашем мозге. Сова может приспособиться к ношению стеклянных призм, но только в молодом возрасте. Слуховые нейроны, которые определяют местоположение объектов, полагаясь на крошечную интаураульную задержку (разницу во времени поступления звука в правое и левое ухо), приспособляются к зрительным сигналам. Некоторые аксоны смещаются примерно на полмиллиметра. Два набора связей – нормальный и смещенный – сохраняются на протяжении всей жизни совы.

И это не единственный пример. Я уже объяснял, как ленивый глаз может привести к перманентным нарушениям в зрительной системе ребенка, если не решить проблему в самом раннем возрасте. Этолог и нейрофизиолог Эрик Кнудсен изучил это явление на животной

модели. В рамках эксперимента он надел нескольким молодым совам призматические очки, которые смещали все поле зрения примерно на двадцать градусов вправо, и с их помощью провел детальные исследования нервных механизмов сензитивного периода¹⁴⁶. Как оказалось, только те совы, которые носили призмы в юности, сумели приспособиться к необычным сенсорным сигналам: их слуховые реакции подстроились под сетчатку, и птицы смогли охотиться, опираясь на синхронизированные сигналы слуха и ночного видения. Совам постарше, напротив, не удалось привыкнуть к призмам даже спустя несколько недель. Интересно, что птицы, обученные в юности, сохраняли перманентный нейронный след этого раннего опыта до самой смерти. После обучения одни аксоны слуховых нейронов в нижнем холмике четверохолмия сохранили свое нормальное положение, тогда как другие переориентировались с учетом новой зрительной карты. Всякий раз, когда призмы снимали или, наоборот, снова надевали, совы быстро перестраивались, сдвигая слуховое поле на двадцать градусов. Подобно *parfait* билингу, птицы без труда переключались с одного *langue*^[24] на другой. Их мозг вел перманентную запись двух наборов параметров и позволял им менять конфигурацию в одно мгновение – точно так же, как мозг китайских детей в Канаде, хранивший след звуков родного языка.

У нашего вида раннее научение – будь то игра на фортепиано, развитие бинокулярного зрения или овладение речью – тоже оставляет перманентный след. Став взрослыми, мы быстрее распознаем слова, которые впервые услышали в детстве, скажем, «бутылочка», «папа» или «подгузник». Ранняя синаптическая пластичность навсегда запечатлела их в нашей памяти¹⁴⁷. Ювенильная кора осваивает языки почти без усилий и хранит эти знания в перманентной геометрии аксонов и дендритов.

Чудо в Бухаресте

Повышенная пластичность мозга в первые несколько лет жизни означает, что обучение ребенка следует начинать как можно раньше. Раннее детство – очень чувствительный период, в течение которого нейронные сети трансформируются легче всего. Хотя позже снижение синаптической пластичности делает научение труднее, не будем забывать: именно постепенная фиксация нейронных связей позволяет нашему мозгу сохранять стабильный след всего, что мы усвоили в детстве. Эти перманентные синаптические метки в конечном счете и определяют, кто мы есть.

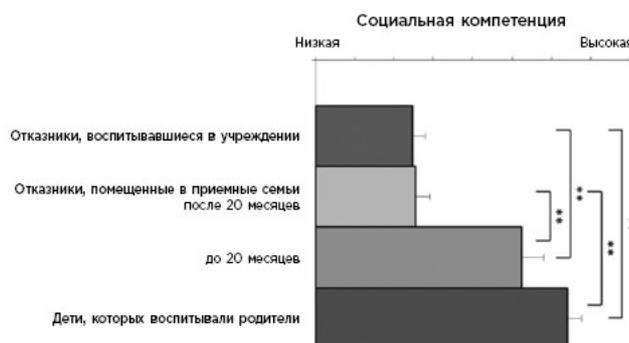
Хотя в раннем возрасте научение протекает легче, было бы ошибкой прислушаться к кредо американского движения «от нуля до трех» и утверждать, что все зависит от этого сензитивного периода. Нет, большая часть научения не происходит раньше трех лет. К счастью, наш мозг остается гибким еще многие годы. Со временем нейропластичность постепенно уменьшается, но никогда не исчезает полностью. Она медленно ослабевает в периферийных сенсорных областях, однако высшие области сохраняют способность к адаптации на протяжении всей нашей жизни. Вот почему многие взрослые пятидесяти или шестидесяти лет успешно учатся играть на музыкальном инструменте или говорить на иностранном языке. Вот почему быстрые и интенсивные педагогические вмешательства иногда творят чудеса. Возможно, реабилитация и не восстановит все тонкости синтаксического движения или восприятия китайских тонов, но она точно поможет ребенку из группы риска превратиться в полноценного и ответственного молодого взрослого.

Бухарестские дети-отказники представляют собой душераздирающий пример этой удивительной гибкости развивающегося мозга. В декабре 1989 года Румыния неожиданно восстала против коммунистического режима. Менее чем за неделю были отстранены от власти диктатор Николае Чаушеску (1918–1989) и его жена: обоих поспешно судили, признали виновными и расстреляли на Рождество. Вскоре после этого мир с ужасом узнал, в каких кошмарных условиях жили подданные этого маленького европейского государства. Одним из самых невыносимых зрелищ оказались детские дома и их обитатели – никому не нужные истощенные дети с мертвыми глазами. В шести сотнях румынских приютов – настоящих домах смерти – проживало почти 150 тысяч мальчиков и девочек. Чаушеску верил, что сила страны заключается в молодежи, а потому ввел в действие безумную политику, направленную на стимулирование рождаемости. В ход шли все средства – от повышения налогов для одиноких людей и супружеских пар без детей до запрета на контрацепцию и аборт (женщинам, решившимся сделать аборт, грозила смертная казнь). Родителям, которые не могли прокормить своих детей, не оставалось ничего другого, кроме как передать их на

попечение государственных служб. Отсюда сотни переполненных приютов, которые не могли обеспечить не только надлежащую гигиену и питание, но и минимум человеческого тепла и когнитивной стимуляции, необходимых для нормального развития ребенка. В результате катастрофическая политика Чаушеску породила тысячи брошенных и несчастных детей с серьезными когнитивными и эмоциональными нарушениями.

После того как страна открыла границы, последствиями этой катастрофы занялись сразу несколько общественных организаций. Так возник исследовательский проект *Bucharest Early Intervention Project*¹⁴⁸. С согласия румынского Государственного секретариата по правам детей гарвардский исследователь Чарльз Нельсон решил изучить, чем чревата жизнь в детском доме и могут ли спасти этих детей приемные семьи. Поскольку в Румынии надлежащей программы усыновления не было, он создал собственную систему и нашел 56 семей, каждая из которых была готова усыновить 1–2 отказников. К сожалению, это была лишь капля в море: благодаря стараниям Нельсона румынские приюты покинуло всего 68 детей. В его статье, опубликованной в журнале *Science*, подробно описано, как 136 детей пронумеровали, а затем тянули бумажки с номерами из большой шляпы. Именно так выбирали тех, кто останется в приюте, а кто наконец обретет новый дом. Эта процедура может показаться шокирующей, но что еще можно было сделать? Поскольку приемных семей было мало, жеребьевка казалась самым справедливым решением. Кроме того, исследователи продолжали собирать средства, чтобы спасти остальных, а также активно консультировали новое румынское правительство по вопросам содержания детей-отказников. Во второй статье, опубликованной в *Science*, было признано, что первоначальное исследование удовлетворяло всем этическим критериям научных исследований¹⁴⁹.

Такая жеребьевка, однако, позволила ученым задать следующий вопрос: при прочих равных условиях действительно ли усыновление в раннем возрасте помогло этим детям восстановиться лучше, чем тем, кто остался в учреждении? Ответ – да, но только если ребенок попал в приемную семью до достижения двадцатимесячного возраста.



Детские травмы оставляют глубокий след в мозге, но раннее вмешательство может свести их к минимуму. Во время диктатуры Чаушеску воспитанники румынских детских домов содержались в ужасных условиях и были лишены общения со взрослыми. К восьми

годам у большинства из них наблюдался выраженный дефицит социальных навыков, причем как у тех, кто остался в учреждении, так и у тех, кого усыновили после достижения двадцатимесячного возраста. Социальное развитие детей, помещенных в приемные семьи в возрасте младше двадцати месяцев, более или менее соответствовало норме.

Десятки предыдущих исследований свидетельствовали о мощном влиянии эмоциональной и социальной изоляции на развитие мозга, и бухарестское исследование не стало исключением: по сравнению с детьми, рожденными в типичной семье, все отказники демонстрировали серьезные нарушения когнитивных функций. Пострадали даже такие фундаментальные аспекты функционирования мозга, как метаболизм глюкозы и общий объем серого вещества. Однако после усыновления некоторые из этих показателей резко возросли. Шесть лет спустя, к восьми годам, дети, помещенные в приемную семью до достижения двадцатимесячного возраста, добились значительного прогресса по сравнению с контрольной группой и ничем не отличались от детей, воспитывавшихся в семьях с рождения. Несколько показателей нормализовались, включая силу альфа-волн, которая является маркером внимания и бдительности. Заметно улучшились социальные навыки и словарный запас.

Тем не менее все эти дети продолжали отставать в других показателях, включая стойкий и, вероятно, перманентный недостаток серого вещества. У детей, усыновленных после того, как им исполнилось двадцать месяцев, нарушения наблюдались во всех областях. Таким образом, никакая поддержка семьи не может полностью нейтрализовать двадцать месяцев отсутствия любви (и нормального питания). В мозге этих несчастных навсегда останутся шрамы от перенесенных ими лишений. И все же бухарестские отказники, как и усыновленные малыши из Кореи, напоминают нам, что никогда нельзя терять надежду. Пластичность мозга, безусловно, наиболее выражена в раннем детстве, но сохраняется в любом возрасте. Последствия детских травм могут быть очень тяжелыми, зато нейронные сети очень гибкие. При своевременном вмешательстве многие повреждения мозга отнюдь не являются необратимыми.

Глава 6

Нейронный рециклинг

Подытожим все, что мы узнали из предыдущих глав. Гипотеза «чистого листа» явно неверна: младенцы рождаются с изрядным количеством базовых знаний, богатым набором универсальных допущений об окружающей среде, с которой они впоследствии столкнутся. При рождении нейронные сети их мозга уже хорошо организованы и содержат интуитивные представления о самых разных областях: объектах, людях, времени, пространстве, числах... Их статистические навыки поразительны: дети ведут себя как маленькие ученые, чьи невероятные способности к научению позволяют им создавать точные модели мира.

Хотя ко времени появления ребенка на свет все крупные пучки волокон уже сформированы, они чрезвычайно пластичны и способны реорганизовывать свои терминальные связи. Всякий раз, когда мы приобретаем новые знания, миллионы синапсов претерпевают изменения. За счет обогащения окружающей среды – например, обучения в школе – дети могут существенно развить свой когнитивный потенциал и приобрести навыки, которые сохранятся на протяжении всей жизни. Однако эта пластичность не безгранична. Она ограничена как в пространстве (в масштабе нескольких миллиметров), так и во времени – многие нейронные сети начинают терять способность к модификации уже через несколько месяцев или лет.

В этой главе мы рассмотрим роль, которую играет формальное образование в раннем развитии мозга. Прежде всего возникает следующий вопрос: как так получилось, что *Homo sapiens* может взять мел (клавиатуру) и начать писать и считать? Как человеку удалось приобрести способности, которые не имели никакого значения для его генетической эволюции? Сам факт, что человек-примат вообще умудряется научиться читать и считать, вызывает удивление. Владимир Набоков (1899–1977) писал: «Сколь несуразно привычно для нас волшебство, в силу которого несколько писанных знаков вмещают бессмертные вымыслы, замысловатые похождения ума, новые миры, населенные живыми людьми, беседующими, плачущими, смеющимися. Что как в один прекрасный день мы, мы все, проснемся и обнаружим, что вовсе не умеем читать?»¹⁵⁰

Я посвятил много времени изучению психики и мозга неграмотных взрослых, будь то в Португалии, Бразилии или на Амазонке. Эти люди никогда не ходили в школу: одни – потому что их семьи не могли себе этого позволить, другие – потому что поблизости не было никаких школ. В определенном смысле они сильно отличаются от нас¹⁵¹: они не только не могут различать буквы, но и испытывают сложности с распознаванием форм и зеркальных отражений¹⁵², сосредоточением на части лица¹⁵³, запоминанием и различением произносимых слов¹⁵⁴. Вот вам и Платон, наивно полагавший, будто чтение может уничтожить внутреннюю память, заставив полагаться на внешнюю память книг. Ничто не может быть дальше от истины. Миф о неграмотном барде, без труда развившем безграничную память, – всего лишь миф. Нам всем нужно тренировать свою память. Кстати, благодаря чтению память становится лучше, а не хуже.

Влияние образования еще более очевидно в математике¹⁵⁵. Мы обнаружили это, изучая амазонских индейцев, которые никогда не учились в школе. Во-первых, многие из них не знают, как точно подсчитать количество предметов. Некоторые их языки даже не включают систему счета: у них есть либо несколько слов для «мало» и «много» (как в языке пирахан), либо смутные слова для чисел от одного до пяти (как в языке мундуруку). Если они вообще обучаются считать, например, используя испанские или португальские цифровые слова (как цимане), то делают это с огромной задержкой по сравнению с западными детьми¹⁵⁶. Во-вторых, неграмотные индейцы обладают лишь зачатками математической интуиции: они различают основные геометрические формы, понимают организацию пространства, могут перемещаться по прямой линии, воспринимают различия между величинами, такими как тридцать и пятьдесят, и знают, что числа можно упорядочить слева направо. Все эти умения приобретены нами в ходе эволюции и есть не только у человека, но и у самых разных животных: воронов, макак, только что вылупившихся цыплят. Образование позволяет существенно развить эти первоначальные навыки. Например, амазонские индейцы, похоже, не понимают, что два любых последовательных числа разделяет один и тот же интервал: +1. Обучение счету и базовым арифметическим действиям переворачивает наши представления о

числовой прямой: мы обнаруживаем, что каждое число n имеет последователя $n + 1$. В конце концов мы понимаем, что все последовательные числа равноудалены друг от друга и образуют линейную шкалу. Очень маленькие дети и необразованные взрослые считают эту прямую сжатой, поскольку большие числа кажутся ближе друг к другу, чем маленькие¹⁵⁷. Если бы человек обладал только приблизительным чувством числа, как другие животные, мы бы никогда не смогли отличить одиннадцать от двенадцати. Точностью нашего чувства числа мы обязаны образованию – и на этом символическом фундаменте зиждется вся математика.

Гипотеза нейронного рециклинга

Каким же образом школе удастся произвести настоящую революцию в наших умственных способностях и превратить нас в приматов, которые читают Набокова, Стейнбека, Эйнштейна или Гротендика? Как мы уже видели, все, чему мы учимся, вызывает модификацию уже существующих нейронных связей, которые в значительной степени организованы при рождении, но сохраняют способность меняться в масштабе нескольких миллиметров. Таким образом, все многообразие человеческой культуры должно укладываться в рамки ограничений, налагаемых нашей нейронной природой.

Чтобы разрешить этот парадокс, я сформулировал гипотезу нейронного рециклинга¹⁵⁸. Идея проста: хотя синаптическая пластичность делает мозг податливым – особенно у человека, чье детство длится пятнадцать или двадцать лет, – наши нейронные связи остаются подверженными сильным анатомическим ограничениям, приобретенным в ходе эволюции. По этой причине каждый новый культурный объект, который мы изобретаем – скажем, алфавит или арабские цифры, – должен найти свою «нейрональную нишу»: набор связей, первоначальная функция которых достаточно близка к их новой культурной роли, но вместе с тем достаточно гибка, чтобы к ней приспособиться. Любое культурное приобретение опирается на перепрофилирование уже существующей нейронной архитектуры, свойства которой оно использует. Таким образом, образование должно вписываться в естественные границы наших нейронных сетей. Это возможно благодаря двум факторам: их разнообразию и длительному периоду нейропластичности, характерному для нашего вида.

Согласно данной гипотезе, самообучение означает рециклирование (повторное использование) уже существующих нейронных сетей. За тысячелетия мы научились делать что-то новое из чего-то старого. Все, чему мы учимся в школе, переориентирует уже существующие нейронные связи в новом направлении. Чтобы читать или вычислять, дети перепрофилируют сети нейронов, которые первоначально развились для других задач, но благодаря пластичности могут адаптироваться к новой культурной функции.

Почему я придумал этот странный термин – «нейронный рециклинг»? Потому что соответствующее французское слово *recyclage* сочетает в себе две идеи, идеально характеризующие происходящее в нашем мозге: вторичное использование некоего материала с уникальными свойствами и переориентацию на новую специальность.

- Рециклировать материал – значит дать ему вторую жизнь путем повторного включения в новый производственный цикл. Такое повторное использование, однако, ограничено: из переработанной бумаги автомобиль не получится! Любой материал обладает внутренними качествами, которые делают его более или менее пригодным для других целей. Точно так же каждый участок коры – в силу своих молекулярных свойств, локальной организации и дальних связей – обладает уникальными характеристиками с самого рождения. Содержание научения должно соответствовать этим материальным ограничениям.

- Во французском языке слово *recyclage* также означает освоение новой специальности или повышение квалификации, позволяющие человеку приспособиться к неожиданным изменениям в карьере. Именно это происходит с нашей корой, когда мы учимся читать или считать. Образование наделяет нашу кору новыми функциями, выходящими за рамки типичных способностей мозга приматов.

С помощью гипотезы нейронного рециклинга я хотел провести четкую грань между быстрым усвоением нового культурного навыка и многими другими ситуациями, когда биология в ходе медленного эволюционного процесса создает что-то новое из чего-то старого. На самом деле, в дарвиновском процессе эволюции путем естественного отбора повторное использование старых материалов – обычное явление. Генетическая рекомбинация может усовершенствовать древние органы и превратить их в элегантные, инновационные

машины. Птичьи перья? Старые терморегуляторы, переделанные в аэродинамические щитки. Лапы рептилий и млекопитающих? Допотопные плавники. Эволюция ведет себя как ремесленник-самоучка, утверждает лауреат Нобелевской премии французский биолог Франсуа Жакоб (1920–2013): в ее мастерской легкие трансформируются в органы для плавания, челюсть рептилии становится внутренним ухом, а оскал голодных хищников превращается в загадочную улыбку Моны Лизы.

Мозг не исключение. Система, отвечающая за речь, например, могла появиться в процессе гоминизации за счет дублирования и перепрофилирования уже существовавших корковых связей¹⁵⁹. Но такие медленные генетические модификации не попадают под мое определение нейронного рециклинга. Более подходящий термин – «экзаптация», неологизм, придуманный гарвардским эволюционистом Стивеном Джеем Гулдом (1941–2002) и йельским палеонтологом Элизабет Врба по аналогии со словом «адаптация». Старый механизм экзаптируется, когда получает иное применение в ходе дарвиновской эволюции. Поскольку в основе лежит распространение генов в популяции, на уровне вида экзаптация действует в течение десятков тысяч лет. Нейронный рециклинг, напротив, происходит в пределах отдельного мозга и в гораздо более короткие сроки, от нескольких дней до нескольких лет. Рециклинг нейронной сети означает переориентацию ее функций без генетической модификации, просто посредством научения и обучения.

Формулируя гипотезу нейронного рециклинга, я прежде всего стремился объяснить невероятный талант нашего вида выходить за пределы уготованной ему экологической ниши. И правда, люди обладают уникальным даром приобретать новые навыки, будь то чтение, письмо, счет, математика, пение, одевание, верховая езда или вождение автомобиля. Повышенная нейропластичность в сочетании с новыми алгоритмами символического научения наделила нас потрясающей способностью к адаптации. Однако человечество быстро придумало способ развить свои навыки еще больше – оно основало школу.

Подчеркивать уникальность человеческого вида не значит утверждать, что нейронный рециклинг не доступен другим животным. Благодаря новейшим технологиям ученые смогли подвергнуть гипотезу рециклинга серьезному испытанию: в течение нескольких недель они обучали обезьян новому навыку, одновременно отслеживая активность одних и тех же сотен нейронов. Эти исследования позволили уточнить простой, но важный вопрос: может ли научение привести к кардинальному изменению нейронного кода в заданной сети или оно, как предсказывает гипотеза рециклинга, только перепрофилирует ее?

В недавнем эксперименте с использованием интерфейса мозг—компьютер исследователи наблюдали, как обезьяна учится управлять собственным мозгом. Чтобы курсор двигался вправо, животное должно было активировать десять определенных нейронов; чтобы курсор двигался вверх – десять других клеток, и так далее¹⁶⁰. Примечательно, что эта процедура сработала: за несколько недель обезьяна научилась управлять активностью десяти произвольно выбранных нейронов, чтобы перемещать курсор по своему желанию. Однако – и это ключевой момент – обезьяна могла заставить курсор двигаться только в том случае, если необходимый паттерн активности не сильно отличался от паттерна активности, который ее кора спонтанно генерировала до обучения. Другими словами, новый навык должен был укладываться в уже существующий репертуар нейронной сети, которую обезьяна пыталась переобучить.

Чтобы оценить результаты этого эксперимента, необходимо понимать, что динамика нейронных связей ограничена. Мозг не исследует все конфигурации активности, к которым может получить доступ. Теоретически в группе из ста нейронов активность может охватывать стомерное пространство, что в совокупности дает непостижимое количество состояний (если учесть, что каждый нейрон может быть включен или выключен, это число превышает 2^{100} , или более тысячи миллиардов миллиардов миллиардов). Однако в реальности активность наблюдается лишь в малой части этой огромной вселенной, обычно ограниченной примерно десятью измерениями. Следовательно, базовое правило можно сформулировать так: обезьяна может выучить новую задачу только в том случае, если то, что требуется от ее коры, «вписывается» в это изначальное пространство. Если, с другой стороны, мы попросим животное активировать комбинацию нейронов, которые никогда не срабатывали вместе, оно потерпит неудачу.

Заметьте, само усвоенное поведение может быть абсолютно новым – кто мог предвидеть, что однажды примату вздумается управлять курсором на мониторе компьютера? Тем не

менее нейрональные состояния, которые делают это поведение возможным, должны вписываться в пространство доступных паттернов корковой активности. Этот результат подтверждает ключевое предсказание гипотезы нейронного рециклинга: приобретение нового навыка требует не радикального переписывания корковых сетей, как если бы они были «чистым листом», а лишь переупорядочивания их существующей организации.

Все больше исследований свидетельствуют о том, что каждая область мозга накладывает свой собственный набор ограничений на научение. В теменной коре нейронная активность обычно ограничивается одним измерением – прямой линией в многомерном пространстве¹⁶¹. Нейроны париетальной (теменной) зоны кодируют все поступающие данные по шкале «маленький—большой», а потому идеально подходят для кодирования величин. Их динамика может показаться чрезвычайно ограниченной, но то, что кажется недостатком, на самом деле оборачивается преимуществом, когда речь заходит о представлении таких величин, как размер, количество, площадь или любой другой параметр, который можно упорядочить от малого к большому. В некотором смысле эта часть коры может быть запрограммирована на кодирование величин; мы систематически задействуем ее всякий раз, когда манипулируем величинами вдоль линейной оси, от чисел до социального статуса (кто «выше» кого на социальной лестнице)¹⁶².

В качестве другого примера возьмем энторинальную кору, которая расположена в височной доле и содержит знаменитые нейроны решетки (мы уже говорили о них в главе 4). В энторинальной коре нейронный код двумерный: хотя в этой части мозга миллионы нейронов, их активность остается ограниченной плоскостью, или, говоря научным языком, двумерным многообразием в многомерном пространстве¹⁶³. Опять же, это свойство отнюдь не является недостатком: очевидно, оно идеально подходит для создания карты окружающей среды, как ее видно сверху. Сегодня мы знаем, что эта область содержит ментальный навигатор, с помощью которого крыса ориентируется в пространстве. Более того, недавние исследования показали, что эта же самая область «вспыхивает» каждый раз, когда нам нужно представить любые данные на двумерной карте¹⁶⁴. Например, в одном эксперименте птицы различались по двум параметрам: длине шеи и длине ног. Научившись репрезентировать это необычное «птичье пространство», испытуемые использовали энторинальную кору (наряду с несколькими другими областями), чтобы перемещаться по нему мысленно.

Этот список можно продолжать и продолжать: вентральная часть зрительной коры превосходно умеет представлять зрительные линии и формы, зона Брока кодирует синтаксические деревья¹⁶⁵ и так далее. Каждой области свойственна своя предпочтительная динамика, которой она остается верна. Каждая проецирует на мир свое собственное пространство гипотез: одна пытается отобразить поступающие данные на прямой линии, другая – на карте, третья – на дереве... Эти пространства гипотез предшествуют научению и в определенном смысле делают его возможным. Мы, конечно, можем усваивать новые факты, но им нужно найти свою нейрональную нишу, пространство репрезентации, адаптированное под их естественную организацию.

Попробуем применить эту идею к наиболее фундаментальным областям научения в школе: арифметике и чтению.

Математика и рециклинг системы, отвечающей за чувство числа

Начнем с математики. Как я уже объяснял в своей книге *The Number Sense* (букв. «Чувство числа»)¹⁶⁶, в настоящее время установлено, что математика (как, впрочем, и многие другие аспекты научения) не отпечатывается в мозге, подобно печати на расплавленном воске. Напротив, математика «втискивается» в предсуществующую, врожденную репрезентацию численных величин, которую она затем расширяет и уточняет.

Как у людей, так и у обезьян теменная и префронтальная кора содержат нейронную сеть, репрезентирующую числа. До любого формального обучения эта система уже включает клетки, чувствительные к приблизительному количеству объектов в заданном множестве¹⁶⁷. Что делает научение? У животных, обученных сравнивать величины, в лобной доле увеличивается количество числовых нейронов¹⁶⁸. Более того, когда они учатся полагаться на арабские цифры, а не на простое восприятие приближенных множеств, часть нейронов начинает избирательно реагировать на эти символы¹⁶⁹. Подобная (частичная) трансформация

сети с целью интеграции такого культурного изобретения, как цифровые символы, является прекрасным примером нейронного рециклинга.

Но вернемся к людям. Когда мы учимся выполнять базовые арифметические действия (сложение и вычитание), мы перепрофилируем не только эту область, но и заднюю теменную кору. Поскольку изначально эта зона отвечает за перемещение взгляда и внимания, ее можно использовать и для перемещения в пространстве чисел: сложение активирует те же самые нейронные сети, которые сдвигают внимание вправо, в направлении больших чисел, а вычитание возбуждает сети, которые сдвигают внимание влево¹⁷⁰. У всех нас в голове имеется своего рода числовая прямая, ментальная карта числовой оси – по ней мы и перемещаемся, выполняя вычисления.

Недавно моя научно-исследовательская группа осуществила более строгую проверку гипотезы рециклинга. Вместе с Мари Амальрик, молодым математиком и когнитивистом, мы решили выяснить, используются ли те же самые сети теменной доли для репрезентации наиболее абстрактных понятий в математике¹⁷¹. Для участия в эксперименте были приглашены пятнадцать профессиональных математиков. Во время сканирования мозга им предъявляли сложные математические выражения, включая формулы типа $\int_S \nabla \times F \bullet dS$, а также утверждения вроде «Любая квадратная матрица эквивалентна перестановочной матрице». Как мы и предполагали, эти высокоуровневые математические объекты активировали ту же самую нейронную сеть, которую задействует младенец, когда видит один, два или три объекта¹⁷², а ребенок постарше – когда учится считать (см. цветную иллюстрацию 12)¹⁷³. Все математические объекты, от топосов Гротендика до комплексных многообразий, или функциональных пространств, уходят своими корнями в рекомбинацию базовых нейронных сетей, присутствующих с детства. Все мы, на любом этапе культурного конструирования математики, от учеников начальной школы до лауреатов Филдсовской премии, постоянно совершенствуем нейронный код этой специфической системы мозга.

Разумеется, ее организация подчинена жестким наследственным ограничениям, налагаемым универсальной генетической природой, которая делает человека человеком. Хотя научение позволяет этой системе приспосабливаться к новым концепциям, ее общая архитектура остается одинаковой у всех нас, независимо от опыта. Мои коллеги и я убедились в этом, изучая организацию мозга математиков, чей сенсорный опыт с детства отличался от опыта большинства других людей. Я говорю о слепых математиках¹⁷⁴. Как ни странно, многие слепые люди становятся блестящими математиками. Пожалуй, самый известный из них – Николас Сондерсон (1682–1739), который ослеп в восемь лет и оказался настолько гениален, что в конце концов занял должность Исаака Ньютона в Кембриджском университете.

Сондерсон больше не доступен для сканирования мозга, но Мари Амальрик и я сумели связаться с тремя современными слепыми математиками. Все трое – преподаватели французских университетов. Один из них – Эммануэль Жиру, настоящий гигант мысли, который ослеп в одиннадцать лет. Он прославился изящным доказательством одной важной теоремы контактной геометрии и в настоящее время руководит крупной лабораторией (60 человек) в Высшей нормальной школе в Лионе.

Само существование слепых математиков опровергает эмпирический подход к мозгу, озвученный Аланом Тьюрингом. Как вы наверняка помните, знаменитый ученый уподобил мозг «блокноту» с «множеством пустых листов», которые постепенно заполняет сенсорный опыт. И правда, разве могли бы слепые люди вывести из своего ограниченного опыта те же самые абстрактные понятия, что и зрячие математики, если бы с рождения не обладали нейронными сетями, способными их генерировать? Как говорит Эммануэль Жиру, перефразируя Лиса из «Маленького принца», «в геометрии самого главного глазами не увидишь, зорек один лишь разум». В математике чувственные переживания не играют большой роли; весь секрет в идеях и понятиях.

Если бы организацию коры в самом деле определял опыт, занятия математикой активировали бы разные области в мозге зрячих людей и слепых математиков, познававших мир с помощью осязания и слуха. Гипотеза нейронного рециклинга, напротив, предсказывает, что нейронные сети, отвечающие за математику, фиксированы. Иными словами, вместить математические понятия может только определенный набор областей мозга, присутствующий при рождении. Именно это мы и обнаружили, просканировав мозг наших трех слепых профессоров. Визуализируя математическое утверждение и оценивая его истинность, они

задействовали те же самые пути в теменных и лобных долях, что и любой зрячий математик (см. цветную иллюстрацию 13). Сенсорный опыт не имел значения: подстроиться под математические репрезентации могла только эта сеть – и никакая другая.

Единственное отличие заключалось в том, что, когда наши слепые математики думали о своем излюбленном направлении исследований, они задействовали первичную зрительную кору в заднем полюсе затылочной доли – область, которая у зрячего человека обрабатывает изображения, попадающие на сетчатку глаза! На самом деле, этот результат предсказал другой блестящий математик, лауреат Филдсовской премии Седрик Виллани. Как-то раз мы обсуждали с ним наш эксперимент (еще до его начала), и он в шутку сказал мне: «Знаете, Эммануэль Жиру поистине великий математик, и все-таки ему очень повезло: поскольку он слеп, он может посвятить математике еще больше коры!»

Виллани был прав. У людей с нормальным зрением затылочная область слишком занята обработкой зрительной информации, чтобы выполнять другие функции. У слепых она не получает никаких сигналов от глаз и трансформируется для выполнения более абстрактных задач, включая умственные вычисления и математику¹⁷⁵. У людей, слепых от рождения, эта реорганизация выражена еще сильнее: зрительная кора реагирует не только на числа и математику, но и на грамматику устной речи, подобно зоне Брока¹⁷⁶.

Причина таких абстрактных реакций зрительной коры у слепых до сих пор остается предметом теоретических дискуссий. Эта реорганизация – подлинный случай нейронного рециклинга или крайний случай пластичности мозга?¹⁷⁷ На мой взгляд, чаша весов склоняется в пользу гипотезы нейронного рециклинга. Если бы пластичность мозга действовала как губка, способная начисто стереть все, что написано на меловой доске зрительной коры, от ее прежней организации не осталось бы следа. Но это не так. Как показывают данные, зрительная кора слепых в значительной степени сохраняет свою нормальную связность и нейронные карты¹⁷⁸, однако использует их для других когнитивных функций. Поскольку эта часть коры очень велика, в мозге слепых людей можно обнаружить «зрительные» области, которые реагируют не только на математику и речь, но и на буквы и цифры (записанные шрифтом Брайля), предметы, места и животных¹⁷⁹. Примечательно, что, несмотря на столь радикальные различия в сенсорном опыте, эти категориально-избирательные области, как правило, расположены в одном и том же месте у зрячих и слепых людей. Например, область, которая реагирует на написанные слова, у слепого человека локализована там же, где и у зрячего читателя, – разница лишь в том, что она реагирует на шрифт Брайля, а не на печатные буквы. Опять же, функция этой зоны в основном определяется ее генетически управляемыми связями с речевыми областями, а также другими врожденными свойствами и поэтому не меняется, когда меняется сенсорный вход¹⁸⁰. Слепые оперируют теми же идеями, категориями и концепциями, что и зрячие люди, и используют для этого те же самые области мозга.

В математике теория нейронного рециклинга подтверждается не только тем фактом, что элементарные понятия ($1 + 1 = 2$) и самые передовые математические идеи ($e^{-i\pi} + 1 = 0$) задействуют одни и те же области мозга, но и результатами сугубо психологических исследований. Все они показывают, что математика, которую мы изучаем в школе, основана на перепрофилировании старых нейронных сетей, отвечающих за приблизительные величины.

Подумайте о числе пять. Прямо сейчас в вашем мозге активируется представление о приблизительной величине, близкой к четырем и шести и далекой от единицы и девяти, – вы активируете числовые нейроны, очень похожие на те, что найдены у других приматов. Нечеткая кривая настройки этих нейронов – с максимумом около пяти и весами в соседних величинах четыре и шесть – является основной причиной, по которой сразу определить, сколько элементов содержит заданное множество – четыре, пять или шесть, – невозможно. Теперь ответьте на такой вопрос: пять больше или меньше шести? Вам кажется, что такие задачи решаются мгновенно? На самом деле, эксперименты показывают, что все зависит от самих величин. Когда числа расположены близко друг к другу, как пять и шесть, вы отвечаете медленнее и допускаете больше ошибок, чем когда они находятся дальше друг от друга, как пять и девять. Этот эффект расстояния¹⁸¹ – одна из характерных особенностей древней системы репрезентации чисел, которую мы перепрофилируем, когда учимся считать и вычислять. Как бы вы ни пытались сосредоточиться на самих символах, ваш мозг не может не активировать нейронные репрезентации этих двух величин. Чем ближе друг к другу они

находятся, тем больше перекрываются. Хотя вы стараетесь думать о «ровно пяти», используя все символические знания, приобретенные в школе, ваше поведение выдает тот факт, что эти знания опираются на эволюционно более старое представление приблизительного количества. Эффект расстояния наблюдается даже в таких элементарных задачах, как «восемь и десять – одинаковые числа или разные?». То же применимо к обезьянам, которых научили распознавать символы арабских цифр¹⁸².

Когда мы вычитаем одно число из другого, скажем $9 - 6$, время, которое мы на это тратим, прямо пропорционально величине вычитаемого числа¹⁸³. Так, пример $9 - 6$ требует больше времени, чем, скажем, $9 - 4$ или $9 - 2$. Мы словно мысленно перемещаемся вдоль числовой прямой, отсчитывая от первого числа ровно столько шагов, сколько задано вторым числом. Естественно, чем дальше нужно идти, тем больше времени это занимает. Мы не обрабатываем символы, как цифровой компьютер; вместо этого мы используем медленную и последовательную пространственную метафору – движение вдоль числовой прямой. Аналогичным образом обстоят дела и с восприятием цен. Чем сумма больше, тем более расплывчатое значение мы ей приписываем. Секрет в том, что точность древнего чувства числа, которым наделены все приматы, постепенно уменьшается: чем число больше, тем точность ниже¹⁸⁴. Вот почему вопреки всякой рациональности мы готовы скинуть несколько тысяч долларов в цене за квартиру, но, покупая хлеб, будем торговаться до последнего: уровень неточности, который мы допускаем, пропорционален величине числа, причем не только у людей, но и у макак.

Этот список можно продолжать: четность, отрицательные числа, дроби – все эти понятия основаны на репрезентации величин, которую мы приобрели в ходе эволюции¹⁸⁵. В отличие от цифрового компьютера мы не можем манипулировать абстрактными символами: мы всегда переводим их в конкретные и часто приближенные величины. Постоянство подобных аналоговых эффектов в образованном мозге выдает древние корни нашего понятия числа.

Приближенные числа – один из столпов, на которых зиждется вся математика. Тем не менее обучение может привести к значительному обогащению этой исходной концепции числа. Математические символы позволяют нам выполнять точные вычисления. Это настоящая революция: в течение миллионов лет эволюция довольствовалась смутными величинами. Усвоение символов – мощный фактор перемен: все наши нейронные сети перепрофилируются, позволяя манипулировать точными числами.

Чувство числа, безусловно, отнюдь не единственный фундамент математики. Ко всему прочему эволюция наделила нас чувством пространства, за которое отвечают особые нейронные сети, содержащие клетки места, решетки и направления головы. Еще у нас есть чувство формы, которое позволяет любому маленькому ребенку различать прямоугольники, квадраты и треугольники. Под влиянием символов, таких как слова и числа, все эти понятия перерабатываются, но как именно это происходит – пока не ясно. Человеческий мозг перекомпоновывает их на языке мышления, формулируя новые понятия¹⁸⁶. Базовые «кирпичики», которые мы унаследовали в ходе нашей эволюционной истории, становятся основополагающими примитивами нового продуктивного языка, на котором математики каждый день пишут новые страницы.

Чтение и рециклинг системы, отвечающей за зрение и устную речь

А что насчет навыков чтения? Это еще один пример нейронного рециклинга: чтобы читать, мы используем области, которые изначально предназначались для зрения и устной речи. В своей книге *Reading in the Brain*¹⁸⁷ (букв. «Чтение в мозге») я подробно описываю систему, которая отвечает за грамотность. Когда мы учимся читать, подмножество зрительных областей приспособляется к распознаванию буквенных последовательностей и отправляет их в центры устной речи. В результате письменные слова обрабатываются точно так же, как и устные: умение читать открывает новые зрительные ворота в нейронные сети, поддерживающие речь.

Задолго до того, как дети научаются читать, они уже обладают сложной зрительной системой, которая позволяет им распознавать и называть предметы, животных и людей. Они могут распознать любое изображение независимо от его размера, положения или ориентации в трехмерном пространстве и знают, как ассоциировать с ним имя. Чтение перепрофилирует часть этой уже существующей нейронной сети, отвечающей за название картинок. Мой

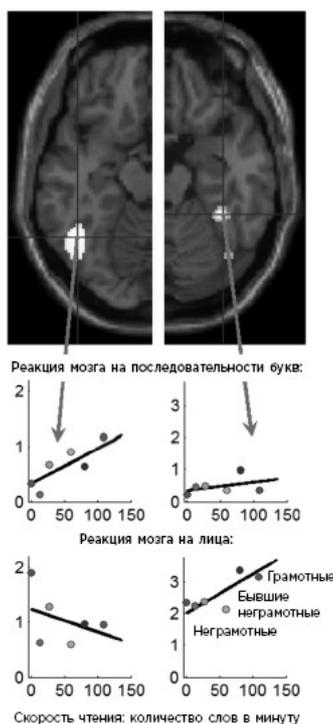
коллега Лоран Коэн и я окрестили ее «областью зрительной формы слова». В этой области сосредоточены все наши знания о цепочках букв. Именно она позволяет нам распознавать слово независимо от его размера, положения, **шрифта** или рЕгИсТрА¹⁸⁸. У любого грамотного человека эта область зрительной формы слова, которая находится в одном и том же месте у всех нас (плюс-минус несколько миллиметров), выполняет двойную функцию: сначала она идентифицирует цепочку выученных знаков, а затем благодаря прямым связям с речевыми областями¹⁸⁹ позволяет быстро перевести их в звук и осмыслить.

Если просканировать мозг неграмотного ребенка или взрослого, когда он учится читать, что мы увидим? Если теория верна, мы должны увидеть, как его зрительная кора реорганизуется. Согласно теории нейронного рециклинга, чтение должно вторгнуться в область коры со схожими функциями и переориентировать ее на новую задачу. В случае чтения разумно ожидать конкуренции с уже существующей функцией зрительной коры, которая заключается в распознавании всех видов объектов, тел, лиц, растений и мест. Может ли быть так, что, научившись читать, мы теряем некоторые зрительные функции, унаследованные нами в ходе эволюции? Или эти функции подвергаются масштабной реорганизации (как минимум)?

Данный парадоксальный прогноз мои коллеги и я проверили экспериментально. Чтобы составить подробную карту областей, меняющихся под влиянием грамотности, мы просканировали мозг неграмотных взрослых в Португалии и Бразилии, а затем сравнили эти данные с результатами обследования жителей тех же деревень, которым посчастливилось научиться читать в школе (в детском или уже во взрослом возрасте)¹⁹⁰. Как и следовало ожидать, с приобретением навыков чтения многие области стали восприимчивы к печатному слову (см. цветную иллюстрацию 14). Покажите предложение, слово за словом, неграмотному человеку, и вы обнаружите, что его мозг реагирует очень слабо: активность охватывает первичные зрительные области, но дальше не распространяется, поскольку буквы не могут быть распознаны. Теперь покажите ту же последовательность слов взрослому человеку, который умеет читать. Вы обнаружите, что на нее откликнется гораздо более обширная сеть корковых нейронов, в том числе область для букв в левой затылочно-височной коре, а также все классические речевые центры, связанные с пониманием языка. Усиленная активность наблюдается и в первичных зрительных областях: с приобретением навыка чтения они, по всей вероятности, подстраиваются под распознавание мелкого шрифта¹⁹¹. Чем быстрее человек читает, тем активнее эти области реагируют на печатные слова и тем сильнее становятся связи между ними: по мере автоматизации навыка чтения преобразование букв в звуки заметно ускоряется.

Противоположный вопрос звучит так: существуют ли области, активность которых не увеличивается, а, наоборот, уменьшается? Ответ – да: у неграмотных людей мозг интенсивнее реагирует на лица. Чем лучше мы умеем читать, тем слабее соответствующая активность в левом полушарии, особенно в том месте, где письменные слова находят свою нишу – в области зрительной формы слова. Мозг как будто «насильно» освобождает место для букв, в результате чего чтение начинает препятствовать выполнению изначальной функции – распознаванию лиц и объектов. Разумеется, все, кто умеет читать, вовсе не разучиваются распознавать лица, а значит, эта функция не просто вытесняется из коры. Как показывают данные, при овладении чтением реакция на лица ослабевает в левом полушарии, которое у большинства людей специализируется на речи, и одновременно усиливается в правом¹⁹².

Впервые мы зафиксировали это явление у грамотных и неграмотных взрослых, а позже – у детей, которые учились читать¹⁹³. Как только ребенок начинает читать, в левом полушарии усиливается активность в области зрительной формы слова, а в правом – активность ее симметричного двойника, реагирующего на лица (см. цветную иллюстрацию 15). Эффект настолько выражен, что компьютерный алгоритм может правильно определить, умеет ли ребенок читать или нет, полагаясь исключительно на интенсивность обработки лиц. При дислексии эти области не развиваются нормально – ни слева, ни справа. Слева не формируется область зрительной формы слова, а справа веретенообразная кора не начинает усиленно реагировать на лица¹⁹⁴. Сниженная активность левой затылочно-височной коры в ответ на письменные слова признана универсальным маркером трудностей с чтением во всех странах, где ее исследовали¹⁹⁵.



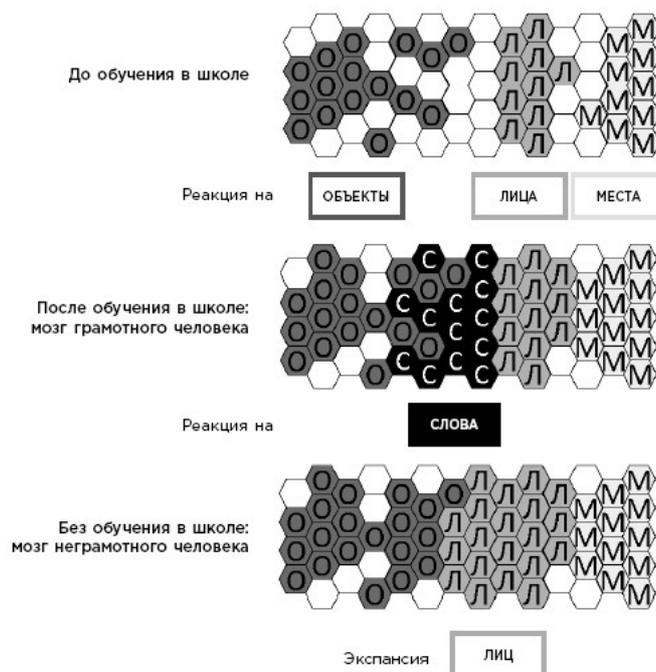
Согласно гипотезе нейронного рециклинга, научение чтению конкурирует с изначальными функциями зрительной коры, в данном случае – с распознаванием лиц. С повышением уровня грамотности – от абсолютной неграмотности до беглого чтения – в левом полушарии усиливается реакция на написанные слова, а функция распознавания лиц смещается в правое полушарие.

Недавно наша лаборатория получила разрешение на проведение другого смелого эксперимента. Мы хотели увидеть, как именно формируется система для чтения у ребенка. С этой целью каждые два месяца, начиная с окончания детского сада и до окончания первого класса, мы приглашали в наш центр визуализации мозга одних и тех же детей. Результаты превзошли все ожидания. Первое сканирование показало не так уж и много: пока дети еще не научились читать, их кора избирательно реагировала на предметы, лица и дома, но не буквы. Однако уже спустя два месяца обучения в школе мы сумели зарегистрировать специфическую реакцию на письменные слова, причем в том же самом месте, что и у взрослых: в левой затылочно-височной коре. Очень медленно менялась и репрезентация лиц: реакция на лица в правом полушарии усиливалась прямо пропорционально скорости чтения. Как и предсказывала гипотеза нейронного рециклинга, чтение конкурировало с предшествующей функцией левой затылочно-височной коры, зрительным распознаванием лиц.

В процессе работы мы поняли, что эту конкуренцию можно объяснить двумя способами. Первая возможность – так называемая «модель нокаута»: с самого рождения лица обрабатывает зрительная кора левого полушария, а чтение выбивает их в правое полушарие. Вторая возможность – так называемая «модель блокировки»: кора развивается медленно, и специализированные участки для обработки лиц, мест и объектов формируются постепенно; попадая в этот развивающийся ландшафт, буквы захватывают часть доступной территории и препятствуют экспансии других зрительных категорий.

Итак, нокаут или блокировка? Как показывают наши эксперименты, модель блокировки представляется более правдоподобной: научение чтению блокирует развитие областей распознавания лиц в левом полушарии. Регулярное МРТ-сканирование детей, которые учились читать, подтвердило наши догадки¹⁹⁶. В возрасте шести-семи лет специализация коры еще далека от завершения. Одни участки активно реагируют на лица, объекты и места, тогда как другие еще не настроились на обработку какой-либо определенной категории. Мы смогли визуализировать их прогрессивную специализацию: когда дети поступали в первый

класс и быстро начинали читать, буквы вторгались в одну из этих неспециализированных зон и перепрофилировали ее. Вопреки тому что я предполагал изначально, буквы не полностью оккупируют ранее существовавший участок для распознавания лиц; они въезжают в «соседний дом», в свободный сектор коры. В этом отношении их можно уподобить агрессивной торговой сети, открывающей супермаркет по соседству с небольшим продуктовым магазинчиком. Экспансия одного останавливает другое – поскольку теперь левое полушарие занято буквами, у лиц нет иного выхода, кроме как переместиться на правую сторону.



Учиться легче в детстве, пока кора головного мозга еще податлива. К первому классу некоторые зрительные области уже демонстрируют выраженную специализацию (распознавание объектов, лиц, мест). Другие остаются неспециализированными или специализированными незначительно (обозначены пустыми шестиугольниками). Чтение вторгается в эти лабильные сети и блокирует экспансию других категорий объектов. Если ребенок не учится читать, эти области вовлекаются в распознавание лиц и объектов и постепенно утрачивают способность к распознаванию букв.

Вкратце: вентральная зрительная система продолжает претерпевать масштабную реорганизацию в течение первых нескольких лет обучения в школе. Тот факт, что обычно в наших школах детей учат читать в возрасте от шести до восьми лет, прекрасно согласуется с доказательствами интенсивной пластичности мозга в этот период. Мы организовали нашу систему образования таким образом, чтобы она эффективно использовала преимущества сензитивного периода, когда зрительная кора особенно податлива. Хотя общая архитектура сильно ограничена от рождения, нижневисочная кора человека обладает замечательной способностью адаптироваться к разным формам и всем видам образов. Подвергаясь воздействию тысяч письменных слов, эта область перепрофилирует на новую деятельность специфический сектор, который внутренне связан с речевой системой.

По мере того как мы становимся старше, наша зрительная кора, кажется, постепенно теряет способность настраиваться на новые образы. Прогрессирующее закрытие сензитивного периода делает все более и более трудным эффективное распознавание букв и их комбинаций. Мы с коллегами обследовали двух человек, которые пытались научиться читать уже во взрослом возрасте: один из них никогда не ходил в школу, а другой перенес небольшой инсульт в области зрительной формы слова, что привело к развитию алексии – неспособности читать. Мы регулярно сканировали их мозг в течение двух лет¹⁹⁷. Прогресс

шел невероятно медленно. У первого испытуемого в конечном счете сформировалась специализированная область для букв, но это никак не повлияло на обработку лиц: нейронные связи для распознавания лиц отпечатались в его мозге и, казалось, утратили всякую подвижность. Пациент с инсультом, напротив, так и не смог воссоздать новую «буквенную кассу» в зрительной коре. Он мог читать, но очень медленно. Расшифровка каждого слова требовала особых усилий – будучи взрослым, его мозг не обладал нейронной пластичностью, необходимой для трансформации части коры в автоматическое считывающее устройство.

Музыка, математика и лица

Вывод прост: чтобы перепрофилировать зрительную кору и в совершенстве уметь читать, необходимо воспользоваться периодом максимальной пластичности, характерным для раннего детства. Как показывает наше исследование, это относится не только к чтению букв. Возьмем, например, ноты: у музыканта, который научился читать ноты в раннем возрасте, музыкальным символам посвящено почти в два раза больше площади зрительной коры, чем у человека, который никогда не учился музыке¹⁹⁸. Поскольку это обширное пространство на поверхности коры теперь оккупировано нотами, область зрительной формы слова смещается со своего нормального положения: в отличие от немусыкантов у музыкантов участок коры, реагирующий на буквы, сдвинут почти на один сантиметр в сторону.

Другой пример – способность расшифровывать математические уравнения. Опытный математик должен уметь распознавать такие туманные выражения, как $\pi = 3,141592\dots$, $\varphi = 1,61803394\dots$, $f(x) = a_0 +$ или $e^x =$, точно так же, как мы – предложения в романе. Однажды я присутствовал на конференции, в рамках которой блестящий французский математик Ален Конн (еще один лауреат Филдсовской премии) продемонстрировал необычайно сложное уравнение длиной в двадцать пять строк. По его словам, оно описывало физику всех известных элементарных частиц. Другой математик ткнул пальцем куда-то в середину и спросил: «Разве в тринадцатой строке нет ошибки?» – «Нет, – немедленно ответил Конн. – Компенсирующий член находится вот тут, на четырнадцатой строчке!»

Как эта замечательная способность к сложным формулам отражена в мозге? Томография показывает, что математические объекты вторгаются в латеральные затылочные области обоих полушарий – у математиков эти зоны реагируют на алгебраические выражения гораздо интенсивнее, чем у нематематиков. И снова мы наблюдаем конкуренцию с лицами: на этот раз участки коры, реагирующие на лица, исчезают в обоих полушариях¹⁹⁹. Другими словами, если грамотность просто вытесняет лица из левого полушария в правое, регулярное манипулирование числами и уравнениями препятствует репрезентации лиц с обеих сторон, приводя к глобальному сжатию системы распознавания лиц.

Заманчиво соотнести это открытие со знаменитым мифом об эксцентричном математике, не интересующемся ничем, кроме своих уравнений, и неспособном узнать своего соседа, свою собаку или даже собственное отражение в зеркале. И правда, существует множество анекдотов и шуток о рассеянных математиках. Например, в чем разница между математиком-интровертом и математиком-экстравертом? Разговаривая с вами, интроверт смотрит на свои ботинки, а экстраверт – на ваши!

На самом деле, мы пока не знаем, связана ли редукция коркового ответа на лица у любителей математики непосредственно с предполагаемым отсутствием у них социальной компетенции (что, я бы сказал, скорее миф, чем реальность: многие математики прекрасно чувствуют себя в обществе). В данном случае причина и следствие пока не установлены. Математические формулы действительно снижают реакцию на лица? Или математики погружаются во вселенную уравнений потому, что находят их более легкими, чем социальные взаимодействия? Каков бы ни был ответ, а) корковая конкуренция действительно существует и б) представление лиц в нашем мозге крайне чувствительно к образованию и обучению в школе, вплоть до того, что может служить надежным маркером математических и музыкальных навыков ребенка. Нейронный рециклинг – это реальность.

Роль обогащенной среды

Суть в том, что и сторонники ключевой роли наследственности, и сторонники ключевой роли среды правы: мозг ребенка и структурирован, и пластичен одновременно. При

рождении он уже содержит множество специализированных нейронных сетей, сформированных генами, которые были отобраны в ходе десятков миллионов лет эволюции. Благодаря этой самоорганизации младенец располагает интуитивными представлениями в основных областях знаний: чувством физических законов, управляющих объектами и их движением; способностью к ориентации в пространстве; представлениями о числах, вероятностях и математике; влечением к другим человеческим существам; даже невероятным талантом к овладению языками. Таким образом, метафора «чистого листа» явно ошибочна. И все же эволюция оставила лазейку и для научения. Не все предопределено в мозге ребенка. Совсем наоборот: детали нейронных сетей в масштабе нескольких миллиметров в значительной степени формируются в результате взаимодействия с внешним миром.

В течение первых лет жизни гены диктуют перепроизводство синаптических контактов: в мозге ребенка образуется в два раза больше синапсов, чем нужно. Хотя конкретный механизм изучен не до конца, это изначальное изобилие обеспечивает огромное пространство ментальных моделей мира. Мозг маленьких детей изобилует возможностями и исследует гораздо более широкий спектр гипотез, чем мозг взрослых. Каждый ребенок открыт для всех языков, всех систем письменности, всей возможной математики – в генетических пределах нашего вида, конечно.

Кроме того, мозг ребенка наделен еще одним врожденным даром – мощными алгоритмами научения, которые отбирают наиболее полезные синапсы и нейронные сети, тем самым обеспечивая второй уровень адаптации организма к окружающей среде. Благодаря им уже в первые дни жизни в мозге начинается процесс специализации и формирования окончательной конфигурации. Первыми теряют пластичность сенсорные области: первичные зрительные зоны созревают в течение нескольких лет, а слуховые научаются различать гласные и согласные звуки родного языка менее чем за год. Всего через несколько лет после завершения сензитивных периодов все мы становимся носителями соответствующего языка, письменности и культуры. Если же человек лишен стимуляции в некоей области, будь то дети-отказники в Бухаресте или неграмотные бразильцы, он рискует навсегда утратить ментальную гибкость в данной сфере знаний.

Это не значит, что любое вмешательство в более старшем возрасте бесполезно: мозг сохраняет некоторую пластичность на протяжении всей своей жизни, особенно в таких высших областях, как префронтальная кора. Тем не менее данные свидетельствуют о том, что раннее вмешательство – самое эффективное. Какова бы ни была задача – приучить сову носить очки, обучить приемного ребенка второму языку или помочь приспособиться к глухоте, слепоте или потере целого полушария, – чем скорее начнется ее выполнение, тем лучше.

Школы – учреждения, призванные максимально использовать пластичность развивающегося мозга. Современная система образования в значительной степени опирается на поразительную гибкость детского мозга, позволяющую ему перестраивать некоторые из своих нейронных сетей и переориентировать их на новые виды деятельности, такие как чтение или математика. Обучение, которое начинается в раннем возрасте, может изменить всю нашу жизнь. Многочисленные эксперименты показывают: для детей из неблагополучных семей, сумевших извлечь выгоду из раннего педагогического вмешательства, даже спустя десятилетия характерен более низкий уровень преступности, более высокий IQ, лучшее финансовое положение и более крепкое здоровье²⁰⁰.

Но учеба в школе – это не волшебная пилюля. Родители обязаны постоянно стимулировать мозг своего ребенка и максимально обогащать окружающую его среду. Все дети – подающие надежды физики, которые обожают экспериментировать с гравитацией и падающими телами, – если, конечно, им позволяют возиться, строить, терпеть неудачи и начинать все сначала, а не заставляют часами сидеть пристегнутыми в автокресле. Все дети – начинающие математики, которые обожают считать, измерять, рисовать линии и круги, собирать фигуры, – при условии что их исправно снабжают линейками, циркулями, бумагой и увлекательными математическими головоломками. Все младенцы – прирожденные лингвисты: уже в 18 месяцев они легко усваивают от десяти до двадцати слов в день – но только в том случае, если взрослые разговаривают с ними. Задача родственников и друзей – поддерживать этот аппетит к знаниям. Как? Прежде всего грамотными предложениями и богатым лексиконом. Многие исследования показывают, что словарный запас ребенка в возрасте трех-четырёх лет напрямую зависит от того, сколько и как с ним разговаривают в

первые годы его жизни. Пассивного приобщения недостаточно: необходимо активное взаимодействие один на один²⁰¹.

Все исследования дают на удивление схожие результаты: обогащение среды, окружающей маленького ребенка, помогает ему совершенствовать свой мозг. Например, у детей, которым каждый вечер читают сказки, нейронные сети, отвечающие за устную речь, развиты лучше, чем у малышей, которые не слушают истории на ночь. Именно эти усиленные корковые пути позже позволят им понимать тексты и формулировать сложные мысли²⁰². Аналогичным образом дети, которым посчастливилось родиться в двуязычных семьях, без труда осваивают два лексикона, две грамматики и две культуры²⁰³. На протяжении всей жизни их билингвальный мозг сохраняет способности к речевой обработке и овладению третьим или четвертым языком, а в преклонном возрасте дольше сопротивляется разрушительному воздействию болезни Альцгеймера. Стимулирующая среда позволяет развивающемуся мозгу сохранять большее количество синапсов, более крупные дендриты и более гибкие нейронные сети²⁰⁴ – подобно сове, которая научилась носить призматические очки и на всю жизнь сохранила диверсифицированные дендриты и способность быстро переключаться с одного поведения на другое. Разнообразие портфолио раннего научения своих детей: расцвет их мозга частично зависит от богатства стимуляции, которую они получают от окружающей среды.

Часть III

Четыре столпа научения

Сама по себе синаптическая пластичность не может объяснить необычайный успех нашего вида. Фактически она присуща всем живым существам: модифицируемые синапсы есть даже у обыкновенных мух, червей-нематод и морских слизней. Если *Homo sapiens* стал *Homo docens*, а научение – нашей экологической нишей и основной причиной глобального распространения, то это потому, что человеческий мозг содержит целый набор дополнительных механизмов.

Так, в ходе эволюции появились четыре функции, позволившие максимизировать скорость, с которой мы можем извлекать информацию из окружающей среды. Я называю их четырьмя столпами научения, ибо каждая из них вносит важный вклад в обеспечение устойчивости наших умственных построений: если хотя бы один из этих элементов отсутствует или выражен недостаточно, вся структура рушится. Когда же нам нужно чему-то научиться, причем быстро, эти функции позволяют оптимизировать усилия.

Итак, четыре столпа научения таковы:

- внимание, обеспечивающее усиление (амплификацию) информации, на которую оно обращено;
- активное вовлечение, или «любопытство», – алгоритм, побуждающий мозг непрерывно проверять новые гипотезы;
- обратная связь, дающая возможность сравнивать прогнозы с реальностью и корректировать внутренние модели мира;
- консолидация, позволяющая автоматизировать то, чему мы научились (главным образом во время сна).

Эти функции свойственны не только человеку, но и многим другим видам. Тем не менее благодаря нашему социальному мозгу и речевым навыкам мы используем их более эффективно, чем любое другое животное, – особенно в семьях, школах и университетах.

Внимание, активное вовлечение, обратная связь и консолидация – вот главные составляющие успешного научения. Эти фундаментальные компоненты архитектуры нашего мозга работают как дома, так и в классе. Учителя, которым на своих уроках удастся задействовать все четыре функции, могут не сомневаться: их ученики будут учиться максимально быстро и эффективно. Посему овладеть и уметь управлять этими функциями следует каждому из нас.

Глава 7

Внимание

Вообразите, что вы приезжаете в аэропорт слишком поздно и рискуете опоздать на самолет. Все в вашем поведении выдает повышенную концентрацию внимания. Ваш ум начеку, вы ищете электронное табло, не отвлекаясь на других людей вокруг, и быстро просматриваете таблицу вылета в поисках своего рейса. Реклама взывает к вам со всех сторон, но вы ее даже не замечаете – вместо этого вы направляетесь напрямик к стойке регистрации. Внезапно вы оборачиваетесь: в толпе оказался ваш друг, и он только что позвал вас по имени. Это сообщение, которое ваш мозг считает приоритетным, переключает все внимание на себя и вторгается в ваше сознание... Мгновение, и вы уже забыли, к какой стойке регистрации должны были подойти.

В течение какой-то пары минут ваш мозг прошел через большинство ключевых состояний внимания: бдительность и настороженность, селекция и дистракция, ориентировка и фильтрация. В когнитивной науке термин «внимание» относится ко всем механизмам, посредством которых мозг отбирает, усиливает, передает и обрабатывает информацию. С точки зрения эволюции это древние механизмы: всякий раз, когда, услышав треск, собаки поворачивают уши, а мыши замирают, они задействуют системы внимания, очень похожие на наши²⁰⁵.

Почему же механизмы внимания развились у столь многих видов животных? Потому что внимание решает одну очень распространенную проблему: переизбыток информации. Наш мозг постоянно бомбардируют раздражители: органы зрения, слуха, обоняния и осязания передают миллионы битов информации в секунду. Первоначально все эти сообщения обрабатываются параллельно отдельными нейронами. Тем не менее анализировать их все на глубинном уровне невозможно: ресурсов мозга просто не хватит. Вот почему пирамида механизмов внимания, организованная подобно гигантскому фильтру, вынуждена производить выборочную сортировку. На каждом этапе мозг решает, насколько важен тот или иной входной сигнал, и выделяет ресурсы на обработку только той информации, которую считает наиболее значимой.

Отбор релевантной информации является основополагающим для научения. В отсутствие внимания обнаружить закономерность в непрерывном потоке данных – все равно что искать иголку в стоге сена. Кстати, это одна из главных причин медлительности традиционных искусственных нейросетей: они тратят слишком много времени на анализ всевозможных комбинаций полученных данных, вместо того чтобы просто отсеять ненужную информацию и сконцентрироваться на релевантных битах. Только в 2014 году два исследователя, канадец Йошуа Бенжио и кореец Кюхён Чо, придумали, как интегрировать внимание в искусственные нейронные сети²⁰⁶. Их первая модель училась переводить предложения с одного языка на другой. Ученые доказали, что внимание крайне важно: новая система училась лучше и быстрее, поскольку могла сосредоточиться на самых важных словах исходного предложения.

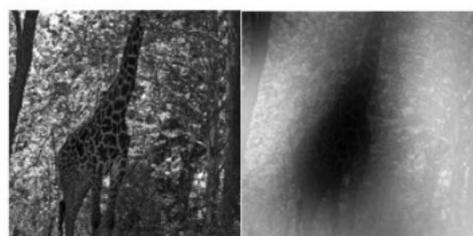
Идея научить машину вниманию молниеносно распространилась в сфере искусственного интеллекта. Если сегодня искусственным системам удастся успешно описать картинку («Женщина бросает летающий диск в парке»), то это потому, что при анализе информации они фокусируют «прожектор» внимания на каждой важной части изображения. При описании летающего диска сеть сосредоточивает все свои ресурсы на соответствующих пикселях и временно удаляет все те, которые соответствуют человеку и парку, – к ним она вернется позже²⁰⁷. В настоящее время ни одна достаточно сложная система искусственного интеллекта больше не соединяет все входы со всеми выходами: она знает, что обучение будет идти быстрее, если простую сеть, в которой каждый пиксель на входе может быть предиктором любого слова на выходе, заменить организованной архитектурой, в которой обучение разбивается на два модуля: первый учится обращать внимание, а второй учится называть данные, отфильтрованные первым.



Женщина бросает летающий диск в парке.



Маленькая девочка сидит на диване с плюшевым мишкой.



Жираф стоит на фоне деревьев.

Первый столп научения – это внимание, механизм столь фундаментальный, что в настоящее время он интегрирован в большинство современных искусственных нейросетей. Здесь машина учится находить слова для описания фотографий. Избирательное внимание действует как прожектор, который высвечивает определенные области изображения (показано белым цветом справа) и отбрасывает все остальное. Таким образом, в любой заданный момент времени внимание позволяет сосредоточить все учебные мощности на выбранном массиве данных.

Хотя способность сосредоточиться на важной информации необходима, она может привести к серьезной проблеме: любая ошибка в направлении внимания чревата остановкой процесса научения²⁰⁸. Если я не замечаю летающий диск, эта часть изображения буквально стирается: система продолжает обрабатывать картинку, как будто данного фрагмента вообще не существует. Информация о диске отбрасывается на ранней стадии и не распространяется за пределы низших сенсорных областей. Оставленные без внимания объекты вызывают лишь умеренное возбуждение, не обеспечивающее практически никакого научения²⁰⁹. Это в корне отличается от многократной амплификации релевантных сигналов, которая наблюдается в нашем мозге всякий раз, когда мы обращаем внимание на объект и осознаем его. Благодаря сознательному вниманию разряды сенсорных нейронов и нейронов концепций^[25], кодирующие объект, усиливаются и передаются в префронтальную кору, возбуждая целые популяции клеток. Последние сохраняют активность в течение долгого времени, значительно превышающего длительность предъявления изображения²¹⁰. Такой сильный всплеск нейронного возбуждения – именно то, что нужно синапсам, чтобы изменить свою силу. Нейробиологи называют это явление длительной потенциацией. Когда ученик, например, обращает сознательное внимание на слово иностранного языка, только что произнесенное учителем, это слово активирует целые популяции корковых нейронов вплоть до префронтальной коры, а потому имеет гораздо больше шансов остаться в памяти. Неосознанные слова и слова, на которые ученик не обратил внимания, остаются на уровне

сенсорных систем и не могут достичь более глубоких лексических и концептуальных репрезентаций, поддерживающих понимание и семантическую память.

Вот почему каждый ученик должен научиться управлять вниманием, а учитель – уделять вниманию больше внимания! Если учащиеся не обращают внимания на нужную информацию, они едва ли чему-нибудь научатся. Величайший талант учителя состоит в том, чтобы постоянно направлять и привлекать внимание детей; без этого эффективное управление процессом научения невозможно.

Внимание играет такую важную роль в отборе релевантной информации, что реализуется во многих нейронных сетях мозга. Американский психолог Майкл Познер выделяет три основные системы внимания:

1) систему сигнализации и активации, которая определяет, когда нужно обратить внимание, и регулирует степень нашей бдительности и настороженности;

2) систему ориентировки, которая подсказывает, на что обратить внимание, и амплифицирует интересующий нас объект;

3) систему управляющего внимания, которая решает, как обрабатывать полученную информацию, отбирает процессы, имеющие отношение к поставленной задаче, и контролирует их выполнение.

Все три системы модулируют мозговую активность и, следовательно, могут не только облегчать научение, но и придавать ему неверное направление. Давайте рассмотрим каждую в отдельности.

Система сигнализации и активации: пробуждение мозга

Первая система внимания, возможно, самая древняя с точки зрения эволюции, говорит нам, *когда* нужно быть начеку, и посылает тревожные сигналы, мобилизующие весь организм. Как только мы замечаем, что приближается хищник, или начинаем испытывать сильные эмоции, целый ряд подкорковых ядер мгновенно переводит кору в состояние «боевой готовности», вызывая массовое и диффузное высвобождение нейромодуляторов, таких как серотонин, ацетилхолин и дофамин (см. цветную иллюстрацию 16). Через длинные ветвящиеся аксоны тревожные сообщения распространяются по всей коре, модулируя ее активность и научение. Некоторые исследователи сравнивают данный феномен с командой «Печать»: фактически сигналы первой системы внимания приказывают коре головного мозга перевести текущее содержание нейронной активности в память.

Эксперименты на животных показывают: срабатывание системы предупреждения может радикально изменить карты коры (см. цветную иллюстрацию 16). Американский нейрофизиолог Майкл Мерзенич провел серию экспериментов, в ходе которых систему сигнализации у мышей «запускали» с помощью электрической стимуляции подкорковых дофаминовых или ацетилхолиновых путей. В результате наблюдался сильный сдвиг в картах коры. Сигналы всех нейронов, которые были активны в тот момент, даже если они не имели никакого объективного значения, подвергались интенсивной амплификации. Например, высокий звук, который систематически ассоциировался с выбросом дофамина или ацетилхолина, со временем начинал вызывать усиленную активность в мозге мыши и захватывал всю слуховую карту. Мышь все лучше и лучше различала звуки, близкие к этой чувствительной ноте, но частично утрачивала способность репрезентировать другие частоты²¹¹.

Примечательно, что такая пластичность коры, вызванная вмешательством в систему сигнализации, отмечается даже у взрослых животных. Анализ задействованных нейронных сетей показывает, что такие нейромодуляторы, как серотонин и ацетилхолин, – главным образом через никотиновый рецептор (чувствительный к никотину, еще одному важному игроку в обеспечении бдительности), – модулируют реакцию корковых тормозных интернейронов, нарушая баланс между возбуждением и торможением²¹². Как вы помните, торможение играет ключевую роль в закрытии сензитивных периодов для синаптической пластичности. Расторможенные сигналами тревоги сети корковых нейронов, по-видимому, частично восстанавливают свою ювенильную пластичность, тем самым вновь открывая сензитивный период для сигналов, которые мозг мыши считает жизненно важными.

А что насчет *Homo sapiens*? Заманчиво предположить, что подобная реорганизация карт коры происходит у всех, кто с детства питает подлинную страсть к искусству или науке. Пыл и воодушевление Моцартов и Рамануджанов^[26] настолько велики, что их мозговые карты буквально кишат ментальными моделями музыки и математики. Как ни странно, это относится не только к гениям, но и ко всем, кто искренне любит свою работу: от простого рабочего до конструктора космических ракет. Позволяя картам коры структурно перестраиваться, страсть порождает талант.

Хотя не все люди Моцарты, системы бдительности и мотивации присутствуют в мозге каждого из нас. Какие же обстоятельства повседневной жизни могли бы их мобилизовать? Или они срабатывают только в ответ на травму и сильные эмоции? Вероятно, нет. Некоторые исследования показывают, что видеоигры – особенно «стрелялки», построенные на жизни и смерти главного героя, – весьма эффективно задействуют наши механизмы внимания. Активируя системы сигнализации и вознаграждения (внутреннего подкрепления), видеоигры модулируют научение. Экшн-игры, например, возбуждают дофаминовую систему²¹³. Психолог Дафна Бавелье показала, что это приводит к быстрому научению²¹⁴. Самые жестокие «стрелялки», по всей видимости, оказывают наиболее интенсивное воздействие – возможно, потому, что сильнее всего мобилизуют сигнальные системы мозга. Так, десяти часов игры вполне достаточно, чтобы значительно улучшить зрительное восприятие, быструю оценку количества объектов на экране и способность сосредотачиваться на цели, не отвлекаясь на посторонние раздражители. Опытный геймер принимает сверхбыстрые решения без ущерба для игры.

Родители и учителя жалуются, что современные дети, активно пользующиеся компьютерами, планшетами, консолями и другими устройствами, постоянно переключаются с одного вида деятельности на другой и не умеют сосредотачиваться. Но это неправда. Видеоигры не снижают нашу способность к концентрации внимания; скорее они ее усиливают. Если так, смогут ли они в будущем помочь нам вновь мобилизовать синаптическую пластичность как у взрослых, так и у детей? Несомненно, видеоигры являются мощным стимулятором внимания. Именно поэтому моя лаборатория разработала целый ряд планшетных игр для обучения математике и чтению, основанных на принципах когнитивной науки²¹⁵^[27].

Однако у видеоигр есть и обратная сторона: они влекут за собой риск социальной изоляции, отнимают слишком много времени и вызывают зависимость. К счастью, есть много других способов разблокировать систему сигнализации и одновременно задействовать социальное чувство мозга. Учителя, которые умеют заинтересовать своих учеников, книги, которые увлекают с первых страниц, фильмы и пьесы, которые переносят зрителя в другой мир, – все это вызывает не менее мощные сигналы, стимулирующие нейропластичность.

Система ориентировки: фильтр мозга

Вторая система внимания определяет, на *что* именно необходимо обратить внимание. Эта система действует как прожектор, освещающий внешний мир. Из миллионов раздражителей, которые бомбардируют наши органы чувств, он выбирает те, на которые следует направить умственные ресурсы в первую очередь. Почему? Потому что они срочны, опасны, привлекательны... или просто важны, с учетом текущих целей и задач.

Отец-основатель американской психологии Уильям Джеймс (1842–1910) в своей книге «Принципы психологии» (1890) так определил эту функцию внимания: «Миллионы элементов внешнего порядка даны моим чувствам, но они никогда не становятся частью моего опыта. Почему? Потому что они мне не интересны. Мой опыт составляет то, на что я согласен обращать внимание. Лишь вещи, которые я замечаю, формируют мое сознание».

Избирательное внимание реализовано во всех сенсорных модальностях, даже в самых абстрактных. Возьмем слух: если собаки могут шевелить ушами, то у нас, людей, движется только внутренний указатель в мозге. Представьте шумную вечеринку: стоит вам услышать интересный разговор, как вы начинаете прислушиваться к нему, опираясь исключительно на смысл и тембр голоса. Или возьмем зрение: чтобы получше рассмотреть заинтересовавший нас объект, мы поворачиваем голову или двигаем глазами. При перемещении взгляда объект попадает в центральную ямку – область высокой чувствительности, расположенную в центре сетчатки. Впрочем, эксперименты показывают: даже не двигая глазами, мы можем осветить

«прожектором» внимания любое место или любой предмет, где бы он ни находился, и амплифицировать его свойства²¹⁶. Точно так же, как мы без труда выделяем один разговор из десятков других, мы можем обратить внимание на один из нескольких рисунков, наложенных друг на друга. И ничто не мешает нам сосредоточиться на цветовой гамме картины, форме кривой, скорости бегуна, стиле писателя или технике художника. Иными словами, в центре внимания может оказаться любая репрезентация в нашем мозге.

Во всех этих случаях эффект один и тот же: внимание амплифицирует все, что попадает в зону действия его «прожектора». Нейроны, кодирующие полученную информацию, повышают свою активность, в то время как шумная болтовня других нейронов приглушается. В итоге мы имеем двойной эффект: внимание не только делает соответствующие нервные клетки более чувствительными к информации, которую мы считаем релевантной, но и многократно усиливает их влияние на остальной мозг. Нижележащие нейронные сети эхом отзываются на стимулы, которые привлекают наш взгляд, слух или разум. В конечном итоге на их кодирование переориентируются обширные участки коры²¹⁷. Проще говоря, внимание действует как усилитель и селективный фильтр.

«Искусство обращать внимание, великое искусство, – говорит философ Ален (1868–1951), – предполагает умение не обращать внимания». В самом деле, выбор объектов, заслуживающих внимания, неразрывно связан с выбором объектов, которые следует проигнорировать. Чтобы некий объект попал в «прожектор» внимания, тысячи других должны остаться в тени. Направлять внимание – значит сортировать, фильтровать и отбирать; вот почему когнитивисты говорят об избирательном внимании. Данная разновидность внимания усиливает избранный сигнал и одновременно снижает интенсивность остальных – всех тех, которые были признаны нерелевантными. На научном языке этот механизм называется «предвзятой конкуренцией». В любой заданный момент времени множество сенсорных сигналов соревнуются за ресурсы нашего мозга. Исход борьбы за обрабатываемые ресурсы решает внимание: представление выбранного элемента оно усиливает, а другие сигналы подавляет. Здесь мы снова можем прибегнуть к метафоре прожектора: чтобы лучше осветить область коры, «прожектор» внимания уменьшает освещенность других областей. Механизм основан на интерферирующих волнах электрической активности: чтобы подавить одну область, мозг испускает медленные волны в альфа-диапазоне (между восемью и двенадцатью герцами), которые тормозят возбуждение, препятствуя распространению когерентной нейронной активности.

Таким образом, фокусировка внимания состоит в подавлении нежелательной информации. Однако при этом наш мозг рискует развить избирательную слепоту ко всему, что он предпочитает не видеть. Слепоту, буквально? Буквально. Это слово вполне уместно: многие эксперименты, включая знаменитый эксперимент с «невидимой гориллой»²¹⁸, показывают, что невнимание может привести к полной потере зрения. В этом классическом эксперименте вас просят посмотреть короткий фильм, в котором баскетболисты, одетые в черное и белое, перебрасывают мяч друг другу. Ваша задача – подсчитать точное количество пасов белой команды. Проще простого, думаете вы. И действительно, через тридцать секунд вы торжествующе даете правильный ответ. Но тут экспериментатор задает странный вопрос: «Вы видели гориллу?» Горилла? Какая горилла? Мы перематываем пленку, и тут вы с изумлением обнаруживаете, что в какой-то момент среди спортсменов появляется актер в костюме гориллы и, остановившись прямо перед камерой, бьет себя кулаком в грудь. Кажется, не заметить его просто невозможно. Более того, эксперименты показывают, что несколько мгновений ваши глаза смотрели прямо на гориллу. Но вы ее не видели. Причина проста: ваше внимание было полностью сосредоточено на белой команде, а потому активно блокировало отвлекающую информацию об игроках в черном... включая гориллу! Увлечшись подсчетом, ваш мозг не смог осознать присутствие в кадре даже такого странного существа.

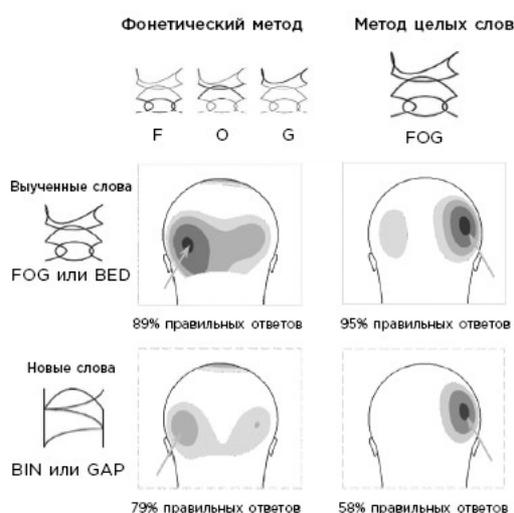
Эксперимент с невидимой гориллой – знаковое исследование в когнитивной науке. Воспроизвести его не составляет труда: в самых разных условиях сам акт фокусировки внимания на некоем объекте делает нас слепыми ко всем посторонним раздражителям. Если, например, я попрошу вас определить, какой звук вы сейчас слышите, высокий или низкий, вы можете не заметить другой стимул, скажем, слово, которое появится на экране через долю секунды. Психологи называют это явление «эффектом мигания внимания»²¹⁹: ваши глаза открыты, но ум будто «моргает» – он всецело занят главной задачей и совершенно неспособен обращать внимание на что-либо еще, даже на такую простую вещь, как одно коротенькое слово.

На самом деле, в таких экспериментах мы становимся жертвами двух различных иллюзий. Во-первых, мы не видим слово или гориллу, что само по себе не есть хорошо. (Другие эксперименты показывают, что из-за невнимания мы можем проворонить красный сигнал светофора или сбить пешехода; вывод – никогда не пользуйтесь мобильным телефоном за рулем!) Вторая иллюзия еще хуже: мы не осознаем, что что-то не осознаем, а потому абсолютно уверены, что видели все, что только можно было увидеть! Большинство участников эксперимента с невидимой гориллой не могут поверить в собственную слепоту. Они думают, что мы их обманули – например, показали два разных фильма. Как правило, все их рассуждения сводятся к одному: если бы на видео действительно была горилла, они бы ее непременно заметили. К сожалению, это не так: наше внимание чрезвычайно ограничено, а потому, когда наши мысли сосредоточены на одном объекте, другие объекты – какими бы несуразными, забавными или важными они ни были – могут полностью ускользнуть от нас и остаться невидимыми. Внутренние ограничения нашего сознания заставляют нас переоценивать то, что можем воспринять мы и другие люди.

Эксперимент с гориллой действительно заслуживает того, чтобы о нем знали все, особенно родители и учителя. Обучая детей, мы автоматически полагаем, что то, что видим мы, может видеть каждый. В результате нам часто бывает трудно понять, почему ребенок, несмотря на наши самые благие намерения, не видит – в самом буквальном смысле этого слова – того, чему мы пытаемся его научить. Но горилла ясно дает понять: видение требует внимания.

Если ученики по той или иной причине отвлекаются и перестают обращать внимание на учителя, они становятся слепы и глухи к тому, что он показывает или рассказывает. А то, что не было воспринято, не будет и усвоено²²⁰.

В качестве примера рассмотрим эксперимент, недавно проведенный американским психологом Брюсом Маккэндлисом и посвященный роли внимания в овладении навыком чтения²²¹. На что лучше обращать внимание: на отдельные буквы слова или на его общую форму? Чтобы это выяснить, Маккэндлисс и его коллеги обучали взрослых необычной системе письма, состоящей из элегантных кривых. Затем они просили испытуемых прочесть шестнадцать уже известных им слов и шестнадцать новых слов и записывали активность их мозга. Без ведома участников эксперимента исследователи манипулировали их вниманием. Одной группе было велено обращать внимание на форму кривых в целом: каждая из них, подобно китайским иероглифам, соответствовала одному слову. Другой группе сказали, что на самом деле кривые состоят из трех наложенных друг на друга букв и что участникам будет легче, если они будут обращать внимание на каждую букву в отдельности. Таким образом, первая группа обращала внимание на целое слово, а вторая группа – на отдельные буквы, которые использовались для записи слов.



Избирательное внимание может переориентировать научение как на подходящие, так и на неподходящие нейронные сети. В этом эксперименте взрослые учились читать слова, записанные необычным способом. Одна группа использовала фонетический подход, другая –

подход целых слов. Те, кто обращал внимание на общую форму слова, не смогли осознать, что слова состоят из букв, даже после трехсот испытаний. Внимание ко всему слову в целом перенаправляло процесс научения на неподходящую сеть нейронов в правом полушарии и препятствовало переносу знаний на новые слова. Испытуемые, анализировавшие буквы, напротив, смогли расшифровать алфавит и прочитать новые слова, используя нейроны вентральной части зрительной коры левого полушария, обычно отвечающие за чтение.

Каковы же были результаты? Обе группы сумели запомнить первые шестнадцать слов, но вектор внимания в корне изменил их способность расшифровывать новые слова. Участники второй группы, анализировавшие буквы, обнаружили много соответствий между буквами и звуками и смогли прочесть 79 процентов новых слов. Более того, исследование их мозга показало выраженную активность в вентральных зрительных зонах левого полушария, обычно отвечающих за чтение. В первой группе, напротив, внимание к форме всего слова полностью подавило способность к обобщению: испытуемые не только не смогли прочесть ни одного нового слова, но и задействовали совершенно не подходящую для этого сеть нейронов, расположенную в зрительных зонах *правого* полушария.

Вывод очевиден: внимание кардинально меняет работу мозга. Сосредоточенность на общей форме слова препятствует обнаружению алфавитного кода и вызывает активность в другом полушарии. Чтобы научиться читать, необходим фонетический подход. Только обращая внимание на соответствия между буквами и звуками, ученик может активировать классическую сеть для чтения, обеспечивающую нужный тип научения. Все учителя начальных классов, обучающие чтению, должны быть знакомы с этими экспериментами: они показывают, как важно правильно направлять внимание детей. Многие исследования убедительно демонстрируют превосходство фонетического метода над методом целых слов²²². Когда ребенок, например, обращает пристальное внимание на уровень букв, отслеживая каждый знак слева направо, процесс научения протекает гораздо легче. Если, с другой стороны, он не получил никаких подсказок и наивно рассматривает слово в целом, не обращая внимания на его внутреннюю структуру, то ничего не происходит. Внимание – вот ключевой компонент успешного научения.

Таким образом, залог качественного преподавания – постоянное внимание к вниманию ученика. Учителя должны тщательно выбирать то, к чему они хотят привлечь внимание детей: в конечном счете усвоена будет только та информация, которая оказалась в центре внимания. Стимулы, проигравшие в соревновании за внимание, практически не вызывают изменений в пластичных синапсах ребенка.

По этой причине эффективный учитель уделяет пристальное внимание психическому состоянию своих учеников. Во-первых, он постоянно подпитывает детское любопытство, стараясь сделать каждый урок незабываемым, а во-вторых – модифицирует методику преподавания с учетом устойчивости внимания каждого ребенка, обеспечивая активное восприятие на протяжении всего занятия.

Система управляющего контроля: пульс управления мозга

Наша третья и последняя система внимания определяет, *как* обрабатывается полученная информация. Система управляющего контроля, или иначе «центральная исполнительная сеть», представляет собой совокупность нейронных сетей, которые позволяют нам выбирать оптимальный курс действий и придерживаться его²²³. Она объединяет целую иерархию кортикальных областей, главным образом расположенных в лобных долях, – иными словами, всю ту массу коры, которая лежит под нашим лбом и включает почти треть человеческого мозга. По сравнению с другими приматами, наши лобные доли увеличены, лучше связаны и содержат большее количество нейронов, каждый из которых обладает более ветвистым и сложным дендритным деревом²²⁴. По этой причине неудивительно, что когнитивные способности человека гораздо более развиты, чем у любого другого примата. Особенно это верно в отношении самого высокого уровня когнитивной иерархии, который дает нам возможность контролировать умственные операции и осознавать свои ошибки, – системы управляющего контроля²²⁵.

Представьте, что вам нужно мысленно умножить 23 на 8. Именно управляющая система следит за тем, чтобы вся последовательность соответствующих мыслительных операций

прошла гладко от начала и до конца. В данном случае она подсказывает вам сперва сосредоточиться на единицах (3), умножить их на 8 и сохранить в памяти результат (24); затем сосредоточиться на десятках (2) и умножить на 8 их; получить 16, вспомнить, что это десятки, и запомнить 160; сложить 24 и 160 и, наконец, получить конечный результат: 184.

Данная система – это пульт управления мозга: он упорядочивает, направляет и регулирует наши ментальные процессы, подобно станционному рабочему, который переключает стрелки на крупной железнодорожной станции и следит за тем, чтобы каждый поезд попал на нужные рельсы. Центральная исполнительная система мозга считается одной из систем внимания, поскольку, как и другие, выбирает из множества возможностей – в данном случае из доступных умственных операций, а не из стимулов, поступающих из внешнего мира. Таким образом, пространственное внимание и управляющее внимание дополняют друг друга. Вернемся к ситуации, когда нам нужно умножить 23 на 8. Система пространственного внимания сканирует страницу учебника и высвечивает пример 23×8 . Далее «прожектором» внимания управляет уже исполнительная сеть: именно эта система выбирает 3 и 8, передает их соответствующим нейронам для умножения и так далее. Центральная исполнительная сеть активирует актуальные операции и тормозит неактуальные. Она постоянно следит за тем, чтобы ментальная программа работала гладко, и решает, когда необходимо поменять стратегию. Эта же система в пределах специализированной подсети поясной коры обнаруживает, когда мы совершаем ошибку или отклоняемся от цели, и немедленно корректирует текущий план действий.

Существует тесная связь между управляющим контролем и тем, что когнитивисты называют рабочей памятью. Чтобы следовать мысленному алгоритму и контролировать его выполнение, мы должны постоянно держать в уме все элементы намеченной программы: промежуточные результаты, предыдущие шаги, предстоящие операции... Иными словами, управляющее внимание управляет всеми входами и выходами так называемого нейронального глобального рабочего пространства. Под ним я подразумеваю временную сознательную память, в рамках которой мы можем хранить практически любую информацию, которая кажется нам актуальной, и передавать ее любому другому модулю²²⁶. Глобальное рабочее пространство – своеобразный маршрутизатор, регулировщик, который решает, как и в каком порядке передавать данные множеству разных процессоров, которые содержит наш мозг. На этом уровне умственные операции выполняются медленно и последовательно: это система, которая обрабатывает один фрагмент информации за раз, а потому не способна выполнять две операции одновременно. По этой причине психологи часто называют ее «центральной узким местом».

Неужели мы действительно не в состоянии выполнять две ментальные программы одновременно? Иногда нам кажется, что мы можем делать два дела сразу или даже следовать двум разным направлениям мысли, но это чистая иллюзия. Чтобы в этом убедиться, проведем небольшой эксперимент. Допустим, мы попросили мистера X нажимать две кнопки: левую, если он слышит высокий звук, и правую, если он видит букву Y. Когда две цели возникают одновременно или в тесной последовательности друг за другом, мистер X выполняет первую задачу с нормальной скоростью, а вторую – гораздо медленнее. Отставание прямо пропорционально времени, затраченному на принятие первого решения²²⁷. Другими словами, первая задача тормозит выполнение второй: пока наше глобальное рабочее пространство занято первым решением, второе вынуждено ждать вплоть до нескольких сотен миллисекунд. Но это еще не самое страшное: если вы слишком сосредоточены на первой задаче, вторую задачу вы можете вообще пропустить. Примечательно, что никто из нас не осознает задержки при выполнении двояких задач – по определению мы осознаем только ту информацию, которая попала в сознательное рабочее пространство. В то время как сознание обрабатывает первый стимул, второй должен ждать за дверью, пока глобальное рабочее пространство не освободится. К несчастью, у нас нет интроспекции этого времени ожидания: мы уверены, что второй стимул появился именно тогда, когда мы закончили с первым, и что наш мозг обработал его с нормальной скоростью²²⁸.

Ни один человек не осознает своих ментальных ограничений (и правда, странно, если бы мы могли каким-то образом осознать отсутствие осознания!). Почему же мы верим, что способны к многозадачности? Единственная причина состоит в том, что мы не осознаем огромную задержку, которую она вызывает. В итоге многие из нас продолжают переписываться за рулем. А ведь давно доказано, что SMS-переписка – один из самых

отвлекающих видов деятельности! Магия электронного экрана и миф о многозадачности входят в число наиболее опасных измышлений нашего цифрового общества.

Хорошо, а как насчет упражнений? Можем ли мы вообще научиться делать несколько вещей одновременно? Можем, но только при интенсивной тренировке одной из двух задач. Автоматизация освобождает сознательное рабочее пространство: доведя деятельность до автоматизма, мы впредь выполняем ее бессознательно, не задействуя центральные ресурсы мозга. Благодаря усердной практике, например, профессиональный пианист может разговаривать во время игры, а машинистка – перепечатывать документ, слушая радио. Однако это редкие исключения, до сих пор вызывающие жаркие дискуссии среди психологов: не исключено, что их управляющее внимание быстро переключается с одной задачи на другую²²⁹. Основное правило гласит: в любой многозадачной ситуации, когда нам приходится выполнять несколько когнитивных операций под контролем внимания, по крайней мере одна из них замедляется или забывается совсем.

В силу выраженного эффекта distraction умение сосредоточиваться является важнейшим компонентом научения. Глупо надеяться, что ребенок или взрослый будут учиться двум вещам одновременно. Обучение требует внимания к ограничениям внимания и, следовательно, тщательной расстановки приоритетов, т. е. установления очередности выполнения тех или иных задач. Любая помеха чревата замедлением или напрасной тратой усилий: всякий раз, когда мы пытаемся делать несколько вещей одновременно, наша центральная исполнительная сеть неизбежно дает сбой. В этом отношении лабораторные эксперименты в сфере когнитивистики прекрасно согласуются с результатами педагогических исследований. Так, эксперименты в школах показывают, что многочисленные украшения на стенах класса отвлекают детей и мешают им сосредоточиться²³⁰. Согласно другому исследованию, успеваемость учащихся, которым на уроке разрешают пользоваться смартфонами, заметно снижается, причем отрицательный эффект сохраняется несколько месяцев²³¹. Вывод: чтобы учиться, мозг должен избегать любых отвлекающих факторов.

Управление вниманием

В общих чертах управляющее внимание соответствует тому, что мы называем «сосредоточением» (концентрацией), или «самоконтролем». Важно отметить, что эта система доступна не сразу: пройдет пятнадцать или двадцать лет, прежде чем наша префронтальная кора достигнет окончательной зрелости. По мере того как мозг оттачивает свою способность к саморегуляции, развивается и управляющий контроль. Обычно этот процесс протекает достаточно медленно и занимает все детство, включая подростковый период. И неудивительно: чтобы центральная исполнительная сеть научилась систематически выбирать подходящие стратегии и тормозить неподходящие, не отвлекаясь на посторонние раздражители, нужно много времени.

Когнитивные психологи знают: чем старше становятся дети, чем лучше им удается сосредоточиваться и тормозить неадекватные стратегии, тем меньше «вопиющих» ошибок они допускают. Первым это заметил психолог Жан Пиаже: он экспериментально доказал, что очень маленькие дети иногда совершают, казалось бы, глупые ошибки. Если, например, вы несколько раз спрячете игрушку в месте А, а затем спрячете ее в месте Б, дети младше одного года продолжают искать ее в месте А (даже если они прекрасно видели, что произошло). Эта знаменитая ошибка «А, не Б» убедила Пиаже, что у младенцев отсутствует понятие о постоянстве объекта – знание о том, что объект продолжает существовать даже тогда, когда он скрыт. Сегодня мы знаем, что эта интерпретация неверна. Анализ движения глаз младенцев показывает, что они знают, где спрятан предмет. Проблема в том, что малыши не могут разрешить внутренний конфликт: в задаче «А, не Б» опыт, который они приобрели в ходе предыдущих испытаний, подсказывает им идти в точку А, в то время как рабочая память настаивает, что сейчас эту привычную реакцию нужно подавить и пойти в точку Б. До десяти месяцев верх одерживает привычка. В этом возрасте детям не хватает управляющего контроля, а не знаний. И правда, ошибка «А, не Б» исчезает примерно в двенадцать месяцев, что напрямую связано с развитием префронтальной коры²³².

Еще одна типичная ошибка, которую совершают все дети, – склонность путать количество и размер. И здесь Пиаже сделал важное открытие, но истолковал его неверно. Он обнаружил, что дети младше трех лет с трудом могут оценить количество предметов в группе. В своих классических экспериментах психолог показывал детям два одинаковых ряда

шариков. Шарики располагались один к одному – так, что даже самые маленькие испытуемые согласились бы, что в первом ряду столько же шариков, сколько во втором. Затем Пиаже увеличивал расстояние между шариками в одном из рядов:



Теперь дети утверждали, что количество шариков в двух рядах неодинаковое и что в более длинном ряду шариков больше. Хотя это удивительно глупая ошибка, она вовсе не означает, что дети в этом возрасте не способны понять закон «сохранения количества». Как мы видели, даже новорожденные дети обладают абстрактным чувством количества, не зависящим ни от промежутков между элементами, ни даже от сенсорной модальности, в которой они представлены. Нет, трудности возникают из-за управляющего контроля. Очень маленькие дети еще не научились подавлять выраженный признак (размер) и усиливать более абстрактный (количество). Даже у взрослых такое избирательное внимание может дать сбой. Попробуйте-ка определить, в каком из двух наборов предметов больше, если предметы в меньшем наборе крупнее по размеру и свободнее распределены в пространстве. А если в одном наборе 7 предметов, а в другом 9? Непросто, верно? То, что развивается с возрастом и обучением, – не столько внутренняя точность системы, отвечающей за оценку количества, сколько способность эффективно использовать ее, не отвлекаясь на несущественные сигналы, такие как плотность или размер²³³. Опять же, прогресс в выполнении таких задач коррелирует с развитием нейронных ответов в префронтальной коре²³⁴.

Подобных примеров великое множество: в любом возрасте и во всех областях знаний – когнитивных и эмоциональных – именно развитие способностей к управляющему контролю позволяет нам избегать ошибок²³⁵. Проверим это на вашем собственном мозге: назовите *цвет чернил* (черные или белые), которыми напечатано каждое из следующих слов:

**СОБАКА ДОМ ХОРОШО ПОЭТОМУ ДИВАН ТОЖЕ
БЕЛЫЙ ЧЕРНЫЙ БЕЛЫЙ ЧЕРНЫЙ БЕЛЫЙ ЧЕРНЫЙ**

собака дом хорошо поэтому диван тоже

белый черный белый черный белый черный

Когда вы добрались до второй строки, вам не показалось, что задание стало сложнее? Готов поспорить, ваша скорость заметно снизилась, и вы стали допускать ошибки. Этот классический эффект (особенно он выражен, если слова напечатаны в цвете) отражает вмешательство системы управляющего контроля. Когда слова и цвета конфликтуют, центральная исполнительная сеть вынуждена подавлять чтение слов, чтобы определить цвет чернил.

Теперь попробуйте решить следующую задачку: «У Мэри двадцать шесть шариков. Это на четыре больше, чем у Грегори. Сколько шариков у Грегори?» Признайтесь, вам хотелось сложить эти два числа? Разумеется, правильный ответ – не тридцать, а двадцать два. В формулировке задачи присутствует слово «больше», хотя нужно вычитать – это ловушка, в которую попадают многие дети, пока не научатся управлять своим вниманием и вдумчиво читать условие, чтобы выбрать нужную арифметическую операцию.

Внимание и управляющий контроль развиваются самопроизвольно по мере постепенного созревания префронтальной коры в течение первых двадцати лет нашей жизни. Однако, как и все остальные, эта система чрезвычайно пластична: исследования показывают, что ее развитие можно ускорить за счет тренировок²³⁶. Поскольку эта система вмешивается в выполнение самых разных познавательных задач, многие виды учебной деятельности, в том числе и игровые, помогают совершенствовать управляющий контроль. Американский психолог Майкл Познер первым разработал программное обеспечение, улучшающее

способность к сосредоточению у маленьких детей. Так, в одной игре малыш должен следить за ориентацией рыбы в центре экрана. Вокруг рыбы-мишени плавают другие рыбы, которые смотрят в противоположном направлении. Постепенно сложность уровней возрастает; в результате ребенок привыкает не отвлекаться на других рыб – простая задача, которая учит концентрации и торможению. Это лишь один из многих способов стимулировать рефлексию и противодействовать немедленному, автоматическому реагированию.



Задолго до того, как были изобретены первые компьютеры, итальянский врач и педагог Мария Монтессори (1870–1952) заметила, что развить внимание у маленьких детей помогают определенные практические занятия. В современных школах Монтессори, например, дети ходят по эллипсу, нарисованному на полу. Сначала они просто стараются не выступать за пределы линии, потом ходят с ложкой во рту, затем кладут в ложку шарик для пинг-понга и так далее. Согласно результатам экспериментальных исследований, подход Монтессори оказывает положительное влияние на многие аспекты развития ребенка²³⁷. Другие исследования показали: улучшить внимание позволяют видеоигры, медитация и игра на музыкальном инструменте. Как известно, контроль над телом, глазами и дыханием в сочетании с одновременной координацией движений обеих рук – мучительно сложная задача для любого ребенка. Вероятно, именно поэтому занятия музыкой с самого раннего возраста положительно сказываются на развитии всех систем внимания, включая выраженное двустороннее утолщение префронтальной коры²³⁸.



Управляющее внимание, способность к сосредоточению и самоконтролю, развивается с возрастом и практикой. Один из способов улучшить концентрацию внимания и самоконтроль – занятия музыкой. У музыкантов кора толще, чем у нем музыкантов, особенно ее дорсолатеральная префронтальная часть, которая играет важную роль в управляющем контроле.

Тренировка управляющего контроля даже может повысить IQ человека. Возможно, вам покажется это удивительным, ведь IQ часто рассматривается как данность –

фундаментальная детерминанта умственного потенциала детей. Тем не менее коэффициент интеллекта – всего лишь поведенческая способность, и как таковая она поддается модификации в процессе обучения. Все наши способности, и IQ в том числе, основаны на специфических нервных связях, синаптический вес которых можно изменить с помощью упражнений. Так называемый подвижный интеллект – способность рассуждать и решать новые задачи – активно задействует систему управляющего контроля: и подвижный интеллект, и система управляющего контроля мобилизуют одни и те же участки мозга, в частности дорсолатеральную префронтальную кору²³⁹. На самом деле, стандартизированные измерения подвижного интеллекта сильно напоминают тесты, которые когнитивные психологи используют для оценки управляющего контроля: и те и другие акцентируют внимание, концентрацию и способность быстро переключаться с одного вида деятельности на другой, не теряя из виду конечную цель. Что интересно, учебные программы, ориентированные на развитие рабочей памяти и управляющего контроля, действительно приводят к умеренному повышению коэффициента подвижного интеллекта²⁴⁰. Эти результаты согласуются с результатами предыдущих экспериментов: хотя интеллект не лишен мощной генетической базы, он может меняться под влиянием некоторых средовых факторов, включая образование. Так, в рамках одного из исследований ученые отслеживали судьбу детей с низким IQ, которых в возрасте 4–6 лет усыновили супруги с высоким и низким социально-экономическим статусом. В подростковом возрасте у тех, кто попал в более обеспеченные семьи, коэффициент интеллекта повысился на двадцать единиц, тогда как у остальных – только на восемь²⁴¹. Кроме того, метаанализ влияния образования на интеллект показал: каждый дополнительный год в школе дает повышение IQ на 1–5 единиц²⁴².

В последнее время был проведен целый ряд научных исследований, посвященных оптимизации эффектов когнитивного тренинга и уточнению их границ. Могут ли эти эффекты сохраняться годами? А главное – как сделать так, чтобы они выходили далеко за рамки натренированных задач? Это сложное дело, поскольку по умолчанию мозг склонен решать каждую задачу по-своему, индивидуально. По всей вероятности, секрет кроется в диверсификации учебного опыта; как показывает практика, наилучшие результаты дают образовательные программы, стимулирующие развитие базовых когнитивных навыков рабочей памяти и управляющего внимания в самых разнообразных контекстах.

Некоторые эксперименты вселяют в меня большой оптимизм. Ранняя тренировка рабочей памяти, особенно если она начинается в детском саду, по-видимому, оказывает положительное влияние не только на концентрацию внимания, но и на способности, имеющие самое непосредственное отношение к школе: чтение и математику²⁴³. Это неудивительно: давно известно, что рабочая память является одним из лучших предикторов будущих успехов в арифметике²⁴⁴. Чтобы усилить эффект, достаточно объединить тренировку памяти с обучением понятию «числовая прямая». (Согласно этой фундаментальной идее, все числа располагаются на линейной оси, а сложение и вычитание сводятся к перемещению вправо или влево соответственно²⁴⁵.) Судя по всему, особую пользу эти и другие педагогические вмешательства, которые начинаются в детском саду и предполагают эксплицитное преподавание основ научения и внимания, приносят детям из неблагополучных семей.

Я обращаю внимание, если ты обратишь внимание

ὁ ἄνθρωπος φύσει πολιτικὸν ζῷον

Человек по природе своей есть общественное (или политическое) животное.

Аристотель (350 до н.э.)

Все виды млекопитающих – в том числе, конечно, и все приматы – обладают системами внимания. Однако в отличие от животных человек наделен одной уникальной способностью, которая еще больше ускоряет процесс научения, – способностью к социальному разделению внимания. У *Homo sapiens* внимание и научение зависят от социальных сигналов гораздо больше, чем у любого другого примата: я обращаю внимание на то, на что обращаешь внимание ты; я учусь тому, чему меня учишь ты.

С самого раннего возраста младенцы пристально всматриваются в лица, при этом особое внимание они обращают на глаза. Услышав чей-то голос, малыши прежде всего стараются перехватить взгляд говорящего. Только после того, как зрительный контакт установлен, они поворачиваются к объекту, на который смотрит взрослый. Эта замечательная способность к разделению внимания – так называемое «совместное внимание» – и определяет то, что в конце концов усваивают дети.

Я уже рассказывал об экспериментах, в ходе которых младенцев обучают значению нового слова. Возьмем слово «пупс». Если ребенок может проследить за взглядом взрослого в направлении того самого пупса, он без труда усвоит это слово всего за несколько попыток. Но если слово «пупс» многократно произносит громкоговоритель, никакого научения не происходит. То же касается овладения фонетическими категориями: девятимесячный американский ребенок, за которым присматривает няня-китаянка, быстро запоминает китайские фонемы. Однако если источником лингвистической стимуляции выступает не живой человек, а видео (пусть даже очень качественное), малыш не научится ничему²⁴⁶.

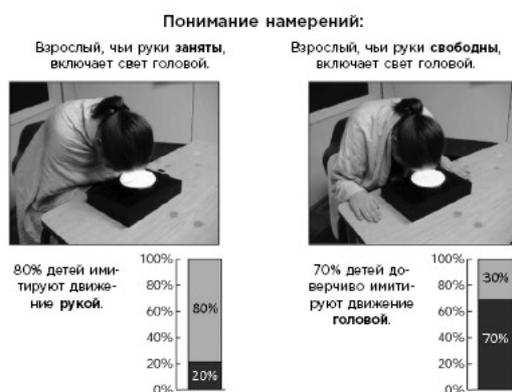
Венгерские психологи Гергели Сибра и Дьердь Гергели постулируют следующее: обучение других и научение у других суть фундаментальные эволюционные адаптации человеческого вида²⁴⁷. *Homo sapiens* – социальное животное, чей мозг снабжен специальными системами для «естественной педагогики». Последние срабатывают всякий раз, когда окружающие пытаются нас чему-то научить. Глобальный успех вида *Homo sapiens* обусловлен, по крайней мере частично, одной специфической чертой, приобретенной нами в ходе эволюции: способностью разделять внимание с другими. Большой частью информации, которой мы владеем, мы обязаны другим людям, а не нашему личному опыту. Таким образом, коллективная культура человека как вида многократно превосходит все то, что каждый индивид мог бы открыть в одиночку. Психолог Майкл Томаселло называет это эффектом «культурного храповика»: подобно тому как храповик не дает лифту упасть, социальный обмен препятствует культурному регрессу. Всякий раз, когда некто делает полезное открытие, оно быстро распространяется на всю группу. Благодаря социальному научению очень редко случается так, что культурный лифт опускается вниз, а ценное изобретение забывается.

Наша система внимания успешно адаптировалась к этому культурному контексту. Исследования Гергели и Сибры не оставляют сомнений: с самого раннего возраста внимание детей «тонко настроено» на сигналы взрослых. Присутствие человека-наставника, который смотрит на ребенка прежде, чем что-то показать, модулирует научение. Зрительный контакт не только привлекает внимание малыша, но и сигнализирует о том, что взрослый собирается научить его чему-то важному. К этому чувствительны даже младенцы: как показывают эксперименты, зрительный контакт побуждает их интерпретировать последующую информацию как важную и поддающуюся обобщению.

Рассмотрим следующий пример. Молодая женщина с улыбкой поворачивается к объекту А. Затем она смотрит на объект Б и хмурится. За происходящим наблюдает полуторагодовалый ребенок. Какой вывод он сделает? Все зависит от сигналов, которыми малыш обменивается со взрослым. В отсутствие зрительного контакта ребенок запомнит только один, весьма специфический фрагмент информации: этой женщине нравится объект А и не нравится объект Б. Если же зрительный контакт установлен, ребенок заключит, что взрослый пытается научить его чему-то важному, а потому сделает более общий вывод: объект А хороший, а объект Б плохой, причем не только для данной конкретной женщины, но и для всех людей вообще. Примечательно, что дети очень чутко реагируют на любые признаки добровольной коммуникации. Если некто демонстрирует явное стремление к общению, дети делают вывод, что этот человек хочет научить их абстрактной информации, а не только своим собственным идиосинкразическим предпочтениям.

Впрочем, важен не только зрительный контакт: так же быстро дети распознают коммуникативное намерение, лежащее в основе акта указания пальцем (в отличие, например, от шимпанзе, которые на это не способны). Даже младенцы понимают, когда взрослый пытается привлечь их внимание и сообщить важную информацию. Проведем простой эксперимент. Если девятимесячный малыш видит, как взрослый пытается привлечь его внимание, а затем указывает на какой-то предмет, позже он может припомнить, как именно этот предмет выглядел. Если же ребенок видит, что тот же самый человек просто тянется к предмету, он запоминает только положение предмета, но не его облик²⁴⁸.

Родители и учителя, не забывайте: для ребенка ваше отношение и ваш взгляд имеют первостепенное значение! Зрительный и вербальный контакт гарантируют, что малыш разделяет ваше внимание, а значит, лучше запомнит информацию, которую вы пытаетесь ему сообщить.



Социальные взаимодействия являются важнейшим компонентом человеческого алгоритма научения. Все, чему мы в итоге научимся, зависит от нашего понимания намерений окружающих. Даже полуторагодовалые дети знают, что, если вы смотрите им в глаза, значит, вы пытаетесь донести до них важную информацию. При наличии зрительного контакта они не только учатся гораздо быстрее и эффективнее, но и обобщают полученную информацию (см. верхний рисунок). Уже в четырнадцать месяцев дети способны правильно интерпретировать намерения других людей: увидев, как человек включает свет головой, они всячески имитируют этот жест, но только в том случае, если руки взрослого были свободны. Если руки взрослого были заняты, малыши понимают, что можно просто нажать кнопку рукой (см. нижний рисунок).

Обучение – это внимание к знаниям других

Ни один другой вид не умеет учить так, как мы. Причина проста: по всей вероятности, мы – единственные животные, обладающие теорией сознания других людей, включая способность воображать чужие мысли, чужие мысли про чужие мысли и так далее и тому подобное, до бесконечности. Данный тип рекурсивной репрезентации типичен для человеческого мозга и играет важнейшую роль в педагогических взаимоотношениях. Преподаватели постоянно думают о том, чего не знают их ученики: фактически одна из их главных обязанностей – адаптация объяснений и подбор примеров с тем, чтобы как можно быстрее повысить уровень знаний своих подопечных. В свою очередь, ученики знают, что учитель знает, что они не знают, а потому интерпретируют всякое действие учителя как попытку поделиться знаниями. Возникает замкнутый круг: взрослые знают, что дети знают, что взрослые знают, что они не знают... Это позволяет взрослым подбирать оптимальные примеры, а детям – успешно их обобщать.

Такие педагогические отношения, по всей вероятности, являются уникальными для *Homo sapiens*. Во всяком случае, на сегодняшний день они не зафиксированы ни у одного другого вида. В 2006 году в знаковой статье²⁴⁹, опубликованной в журнале *Science*, было

описано некое подобие обучения у суриката, небольшого южноафриканского млекопитающего семейства мангустов. На мой взгляд, однако, в исследовании неправильно трактовалось само определение обучения. Чему же учили взрослые сурикаты маленьких сурикатов? Конечно, самому главному – готовить еду! Дело в том, что мангусты сталкиваются с серьезной кулинарной проблемой: они питаются чрезвычайно опасной добычей – скорпионами, и перед едой их смертоносные жала, разумеется, нужно удалить. В этом отношении сурикаты ничем не отличаются от японских поваров, готовящих фугу – рыбу, печень, яичники, глаза и кожа которой содержат смертельные дозы парализующего вещества тетродотоксина: одна ошибка в рецепте – и вы мертвы. Японские повара тренируются три года, прежде чем им разрешат подать первую фугу. А как сурикаты приобретают свои ноу-хау? Согласно статье в журнале *Science*, взрослые сурикаты сначала предлагают своим детенышам «готовую» пищу – скорпионов с удаленными жалами. По мере взросления малыши все чаще получают живых скорпионов и со временем начинают охотиться самостоятельно. По мнению авторов статьи, поведение сурикатов удовлетворяет трем основным критериям обучения: взрослый выполняет некие действия в присутствии детеныша; эти действия требуют от взрослого определенных усилий; детеныш приобретает знания быстрее, чем если бы взрослый не вмешивался.

Случай сурикатов, безусловно, заслуживает внимания: в ходе эволюции у мангустов появился особый механизм, который явно облегчает выживание. Но подлинное ли это обучение? По моему убеждению, имеющиеся данные не позволяют заключить, что сурикаты действительно учат своих детенышей. Проблема в том, что в их поведении отсутствует один очень важный ингредиент: обоюдное внимание к знаниям друг друга. Нет никаких свидетельств того, что взрослые сурикаты обращают внимание на то, что знают детеныши, или, наоборот, что детеныши учитывают педагогические намерения взрослых. Все, что делают взрослые мангусты, – это предлагают растущему потомству более опасную добычу. Насколько нам известно, данный механизм может быть предварительно запрограммирован и специфичен для потребления скорпионов. Другими словами, это сложное, но ограниченное поведение, сравнимое с пресловутым танцем пчел или брачным ритуалом фламинго.

Хотя некоторые ученые попытаются спроецировать на мангустов и скорпионов человеческие представления, более пристальный взгляд показывает, насколько их поведение в действительности далеко от нашего. По большому счету история мангуста-учителя – лишнее доказательство уникальности вида *Homo sapiens*. Подлинные педагогические взаимоотношения, которые складываются в школах и университетах, предполагают прочные ментальные связи между преподавателями и учащимися. Хороший педагог строит мысленную модель своих учеников, их навыков и ошибок и предпринимает все меры, чтобы обогатить их ум. Это идеальное определение заведомо исключает любого учителя (человека или компьютер), который механически преподает стереотипный урок, не адаптируя его содержание к уже имеющимся знаниям и ожиданиям своей аудитории. Такое бездумное, однонаправленное обучение неэффективно. С другой стороны, обучение эффективно только тогда, когда ученики уверены: учитель старается передать свои знания всеми доступными ему средствами. Таким образом, здоровые педагогические взаимоотношения должны основываться на двунаправленных потоках внимания, слушания, уважения и взаимного доверия. В настоящее время нет никаких доказательств того, что такая «модель психического» – т. е. способность учеников и учителей обращать самое пристальное внимание на психическое состояние друг друга – присуща другим животным, помимо человека.

Скромная педагогика суриката далека и от той роли, которую образование играет в человеческом обществе. «Всякий человек – это человечество, его всемирная история», – пишет Жюль Мишле (1798–1874). Благодаря развитой системе среднего и высшего образования мы можем передать своим детям лучшие мысли тысяч поколений, живших до нас. Каждое слово, каждое понятие, которое мы узнаем, – это маленькое завоевание, оставленное нам нашими предками. Без речи, без культурной трансмиссии, без образования никто не смог бы в одиночку изобрести все те инструменты, которые в настоящее время расширяют наши физические и умственные горизонты. Педагогика и культура делают каждого из нас наследником общечеловеческой мудрости.

Впрочем, зависимость *Homo sapiens* от социальной коммуникации и образования – не только дар, но и проклятие. Именно образование виновато в том, что религиозные мифы и ложные сведения распространяются в человеческом обществе так быстро и легко. С самого

раннего возраста наш мозг доверчиво впитывает всю информацию, которую нам сообщают окружающие независимо от того, правдива она или нет. В социальном контексте он ослабляет бдительность; мы перестаем вести себя как ученые и превращаемся в безмозглых леммингов. Иногда это хорошо – например, мы доверяем знаниям учителей, преподающих естественные науки, а потому не чувствуем необходимости повторять каждый эксперимент со времен Галилея! Иногда это плохо – например, когда мы коллективно распространяем непроверенную «мудрость», унаследованную от предков. Так, врачи практиковали кровопускание и баночную терапию в течение столетий, но ни разу не удосужились проверить их реальное действие. (Если вам интересно, и то и другое на самом деле вредно при подавляющем большинстве заболеваний.)

Известный эксперимент показывает, до какой степени социальное обучение превращает умных детей в бездумных подражателей. Уже в четырнадцатимесячном возрасте малыши с готовностью имитируют действия человека, даже если те не имеют смысла²⁵⁰. Особенно если те не имеют смысла. В ходе эксперимента младенцы видят, как взрослый нажимает кнопку головой. Если руки взрослого закутаны в шаль, дети делают вывод, что кнопку можно нажать рукой, и в конечном итоге повторяют действие, а не копируют его во всех деталях. Если же малыши видят, как тот же самый взрослый нажимает кнопку головой без всяких на то оснований – его руки совершенно свободны, – они не рассуждают и, слепо доверяя взрослому, тоже наклоняют голову, хотя это движение бессмысленно. Наклон головы у младенцев, по-видимому, можно считать предшественником тысяч произвольных жестов и обычаев, увековеченных в человеческих обществах и религиях. В зрелом возрасте этот социальный конформизм не только сохраняется, но и усиливается. Даже самые тривиальные из наших перцептивных решений, такие как оценка длины линии, зависят от социального контекста: когда вывод наших соседей не совпадает с нашим, мы часто пересматриваем свое суждение, каким бы неправдоподобным ни казалось мнение других²⁵¹. В таких случаях социальное начало одерживает верх над началом разумным.

Вкратце: мозг *Homo sapiens* оснащен двумя режимами научения – активным, когда мы лично проверяем гипотезы на внешнем мире, как хорошие ученые, и рецептивным, когда мы доверчиво впитываем то, что сообщают нам другие. Именно второй способ за счет эффекта культурного храповика обеспечивал экспансию человеческих обществ на протяжении последних пятидесяти тысяч лет. Однако без критического мышления, которое характеризует первый режим, второй становится уязвимым для ложной информации. Активная проверка знаний, отказ верить простым слухам и личное конструирование смысла – вот основные фильтры, защищающие нас от лживых легенд и гуру. Следовательно, необходимо найти компромисс между двумя режимами научения: ученики, с одной стороны, должны быть уверены в знаниях своих учителей, а с другой – оставаться автономными и критическими мыслителями, актерами своего собственного научения.

Здесь мы вплотную подходим ко второму столпу научения: активному вовлечению.

Глава 8

Активное вовлечение

Возьмите двух котят. На одного наденьте ошейник и поводок, а другого посадите в корзинку. Поместите обоих в устройство карусельного типа – так, чтобы их движения были строго согласованы. Идея в том, что оба котенка получают идентичные зрительные сигналы, но один активен, а другой пассивен. Первый самостоятельно исследует окружающую среду, в то время как второй движется точно таким же образом, но без контроля.

Этот классический эксперимент с каруселью, проведенный Ричардом Хелдом (1922–2016) и Аланом Хейном в 1963 году, когда этика экспериментирования на животных была далеко не так развита, как сегодня, привел к важному открытию: активное исследование мира необходимо для формирования зрительной системы. Эксперимент длился несколько недель. Каждый день котят на три часа помещали в большой цилиндр с полосатыми стенками. Хотя оба получали практически одинаковую визуальную информацию, их зрительные системы оказались различны²⁵². Несмотря на обедненную среду, содержащую только вертикальные полосы, у активного котенка развилось нормальное зрение. Пассивный котенок, напротив, утратил свои зрительные способности и в конце эксперимента не справился даже с базовыми тестами на зрительное восприятие. Например, в тесте «Обрыв» животное ставили на мост, который оно могло покинуть либо со стороны «высокого обрыва», либо со стороны «пологого склона». Нормальное животное не медлило ни секунды и прыгало в сторону последнего. Пассивное животное, напротив, выбирало наугад. Другие тесты показали, что пассивное животное не обладало надлежащей моделью зрительного пространства и не прощупывало поверхность лапами, как это обычно делают кошки.

Пассивный организм не учится

Эксперимент с каруселью, проведенный Хелдом и Хейном, – отличная метафора для нашего второго столпа научения: активного вовлечения. Результаты различных исследований показывают, что пассивный организм учится мало или не учится вообще. Эффективное научение, наоборот, предполагает отказ от пассивности, вовлеченность, исследование, активное генерирование гипотез и их проверку во внешнем мире.

Чтобы учиться, наш мозг должен построить гипотетическую ментальную модель внешнего мира. Затем он проецирует ее на свое окружение и подвергает проверке, сравнивая свои предсказания с данными, поступающими от органов чувств. Этот алгоритм требует активности, заинтересованности и внимания. Мотивация очень важна: мы хорошо учимся только в том случае, если у нас есть четкая цель и мы всеми силами стремимся к ее достижению.

Не поймите меня неправильно: активное вовлечение не означает, что дети должны ерзать за партой весь день! Однажды я побывал в школе, директор которой с гордостью продемонстрировал мне, как он реализовал мой призыв к активности: парты в математическом классе были оборудованы педалями! К несчастью, он упустил суть (и показал, что метафора карусельного эксперимента имеет свои границы). Быть активным и вовлеченным не означает, что тело должно беспрерывно двигаться. Активное вовлечение подразумевает вовлеченность мозга, а не ног. Мозг эффективно учится только в том случае, если он внимателен, сосредоточен и активен в генерировании ментальных моделей. Чтобы лучше усвоить новые понятия, активные ученики постоянно перефразируют их в слова или мысли. Пассивные или, что еще хуже, рассеянные дети не извлекут пользы из урока: в таком состоянии их мозг не обновляет уже существующие ментальные модели. Это не имеет никакого отношения к физическому движению. Два ученика могут практически не шевелиться, но при этом отличаться внутренним движением своих мыслей: один активно следует за учителем, в то время как другой отвлекается и становится пассивным.

Эксперименты показывают, что мы редко учимся, пассивно накапливая сенсорную статистику. Конечно, иногда такое происходит, но преимущественно на низших уровнях сенсорной и моторной систем. Помните эксперименты, когда ребенок слышит сотни слогов, вычисляет вероятности перехода между слогами (например, [bo] и [təl]) и в конечном счете распознает слово (bottle)? Данный тип имплицитного научения, по всей видимости,

сохраняется даже тогда, когда младенцы спят²⁵³. Однако это исключение, которое лишь подтверждает правило: в подавляющем большинстве случаев, когда речь идет о когнитивных способностях высокого уровня, таких как эксплицитное запоминание значений слов, а не просто их формы, научение происходит только тогда, когда учащийся думает, превосхищает и выдвигает гипотезы, рискуя ошибиться. В отсутствие внимания, усилий и глубоких размышлений новый материал «выветривается» из памяти, практически не оставляя следа.

Научение и глубина обработки информации

Рассмотрим классический пример из когнитивной психологии: эффект глубины обработки слов. Представьте, что я даю список из шестидесяти слов трем группам студентов. Первую группу я прошу определить, какими буквами написаны эти слова, прописными или строчными; вторую группу – рифмуются ли эти слова со словом «стул»; третью – являются ли эти слова названиями животных. Когда студенты заканчивают, я предлагаю им тест на запоминание. Какая группа покажет лучший результат? Выясняется, что студенты из третьей группы, которые обрабатывали слова на уровне смысла, запоминают их гораздо больше (75%), чем студенты из двух других групп, которые обрабатывали слова более поверхностно, на уровне букв (33%) или рифмы (52%)²⁵⁴. Разумеется, слабый имплицитный, бессознательный след слов – сублиминальный отпечаток в орфографической и фонологической системах – обнаруживается в памяти участников всех трех групп. Тем не менее эксплицитное запоминание гарантирует только глубинная семантическая обработка. То же самое наблюдается и на уровне предложений: наилучшее удержание материала отмечается у тех учащихся, которые пытаются понять предложения самостоятельно, без помощи учителя²⁵⁵. Американский психолог Генри Редигер формулирует это общее правило следующим образом: «Усложнение условий научения, требующее от учащихся больших когнитивных усилий, часто приводит к лучшему удержанию материала»²⁵⁶.

Нейровизуализационные исследования позволили уточнить источник этого эффекта²⁵⁷. Глубокая обработка оставляет более прочный след в памяти, потому что активирует области префронтальной коры, связанные с сознательной обработкой слов и образующие мощные петли с гиппокампом, который хранит информацию в форме эксплицитных эпизодических воспоминаний.

В культовом фильме «Взлетная полоса» (1962) французского режиссера Криса Маркера (1921–2012) голос за кадром говорит: «Памятные моменты ничем не отличаются от остальных – только позже мы их вспоминаем из-за шрамов, которые они оставляют». Прекрасное изречение... но ложное. Согласно исследованиям, уже в самом начале кодирования воспоминаний события, которые останутся в памяти надолго, можно отличить от тех, которые исчезнут без следа: первые обрабатываются на более глубинном уровне²⁵⁸. Просканировав мозг человека, изучающего набор слов и образов, мы можем предсказать, какой из этих стимулов позже будет забыт, а какой сохранится. Ключевым предиктором служит активность в лобной доле, гиппокампе и соседних областях парагиппокампальной коры. Активное вовлечение этих отделов является прямым отражением глубины, на которую «опускаются» слова и образы в нашем мозге, и прогнозирует силу следа, который они оставят в памяти. Бессознательный образ поступает в сенсорные области, но порождает лишь умеренную волну активности в префронтальной коре. Внимание, сосредоточенность, глубина обработки и осознанность превращают эту маленькую волну в нейрональное цунами, которое охватывает префронтальную кору и максимизирует запоминание²⁵⁹.

Роль активного вовлечения и глубины обработки информации подтверждается результатами целого ряда педагогических исследований в контексте университетского образования. Возьмем, к примеру, физику – в частности, усвоение абстрактных понятий углового и крутящего момента. Мы делим студентов на две группы: одной группе дается десять минут на экспериментирование с велосипедным колесом, а другой – десять минут на устное объяснение и наблюдение за другими студентами. Результат: группа, которая получила возможность активно взаимодействовать с физическим объектом, усвоила материал гораздо лучше²⁶⁰. Следовательно, вовлеченность и более глубокая обработка информации облегчают последующее удержание материала.

В пользу данной закономерности говорит и недавний обзор более двухсот педагогических исследований, проведенных на курсах точных наук для студентов

бакалавриата. Как оказалось, традиционное чтение лекций, во время которых студенты пассивны, а преподаватель разглагольствует пятьдесят минут кряду, неэффективно²⁶¹. По сравнению с методами обучения, содействующими активному вовлечению, систематическое чтение лекций приводит к более низкой успеваемости. Во всех дисциплинах, от математики и психологии до биологии и информатики, активный студент добивается больших успехов. Так, при активном вовлечении экзаменационные баллы повышаются на половину стандартного отклонения, что весьма существенно, а количество неудач снижается более чем на 10%. Но какие стратегии способствуют активной вовлеченности? Единого чудесного метода не существует; зато имеется целый ряд подходов, которые заставляют учащихся думать: практические занятия, семинары, работа в малых группах. Некоторые учителя прерывают урок, чтобы задать трудный вопрос, и дают ученикам время поразмыслить над ответом. Одним словом, подойдут любые решения, которые вынуждают учащихся отказаться от комфортной пассивности.

Неэффективность научения через открытия

Вы можете возразить, что все это далеко не ново. Многие учителя применяют эти идеи. Однако в педагогике нельзя доверять ни традиции, ни интуиции: необходимо научно доказать, какие методики действительно улучшают понимание и удержание материала, а какие нет. Пользуясь случаем, я бы хотел прояснить один очень важный момент. Фундаментально верное представление о том, что дети должны быть активно вовлечены в процесс научения, не следует путать с классическим конструктивизмом или методами научения через открытия. И то и другое – соблазнительные идеи, но, к сожалению, неэффективные, о чем свидетельствуют многочисленные исследования²⁶². К сожалению, это ключевое различие редко принимают во внимание – отчасти потому, что современные педагогические подходы часто называют активными, что ведет к путанице.

Когда мы говорим о научении через открытия, что мы имеем в виду? Суть этих педагогических взглядов восходит к Жан-Жаку Руссо и дошла до нас благодаря таким известным педагогам, как Джон Дьюи (1859–1952), Овидий Декроли (1871–1932), Селестен Френе (1896–1966), Мария Монтессори. Позднее их отстаивали Жан Пиаже и Сеймур Пейперт (1928–2016). «Осмелюсь ли я высказать здесь, – пишет Руссо в своем труде «Эмиль», – самое важное, самое полезное правило во всяком воспитании? Оно заключается не в том, чтобы выигрывать время, а в том, чтобы его терять». Руссо и его последователи убеждены: дети должны сами открывать мир и строить пирамиду своих знаний, пусть даже на «опыты» и исследования уйдут долгие часы... Это время не потеряно, считает Руссо, ибо в конечном счете оно даст автономный ум, способный не только мыслить самостоятельно, но и решать реальные проблемы, а не пассивно получать знания и выдавать заученные и готовые решения. «Научите своего воспитанника наблюдать явления природы, – призывает великий философ, – и скоро вы разожжете его любопытство; но если вы хотите, чтобы его любопытство росло, то не спешите его удовлетворять. Предложите ему задачи, и пусть он их решает сам».

Теория привлекательная... К несчастью, многочисленные исследования, в общей сложности занявшие несколько десятилетий, показывают, что ее педагогическая ценность стремится к нулю. На самом деле, к подобному выводу приходили столь часто, что один исследователь озаглавил свою обзорную статью так: *Should There Be a Three-Strikes Rule against Pure Discovery Learning* – «Почему закон трех ошибок не распространяется на обучение через открытия?»^[28]. Будучи предоставленными сами себе, дети едва ли обнаружат абстрактные правила, управляющие той или иной областью знаний, и практически ничему не научатся. Стоит ли этому удивляться? Как, интересно, за несколько часов и без всякой посторонней помощи ребенок может совершить открытие, на которое у человечества ушло несколько столетий?

Одним словом, метод не работает. Рассмотрим три примера:

- Чтение: само по себе разглядывание напечатанных слов обычно ни к чему не приводит, если только ребенку прямо не говорят о том, что слова состоят из букв, которые передают соответствующие звуки. Мало кому из детей удастся самостоятельно соотнести письменную и устную речь. Только вообразите, какая интеллектуальная мощь понадобилась бы юному Шампольону, чтобы обнаружить, что все слова, начинающиеся со звука [p], пишутся с символом «P» или «p» в левой части... Эта задача была бы невыполнима, если бы учителя не

предлагали детям упорядоченный набор тщательно подобранных примеров, простых слов и отдельных букв.

- Математика: говорят, в возрасте семи лет блестящий математик Карл Гаусс (1777–1855) сам сообразил, как быстро сложить числа от 1 до 100 (попробуйте догадаться и вы; решение приведено в примечаниях²⁶³). Впрочем, то, что сработало с Гауссом, необязательно сработает с другими детьми. Исследования ясно показывают: лучше всего дети учатся тогда, когда учителя математики сначала разбирают пример и лишь затем просят учеников решить аналогичную задачу самостоятельно. Даже если дети достаточно умны и находят решение сами, позже они показывают более низкие результаты, чем дети, которым решение объяснили.

- Информатика: в своей книге «Перевоорот в сознании» (1980) математик и программист Сеймур Пейперт рассказывает, зачем он изобрел компьютерный язык *Logo* (тот самый, с анимированной черепашкой, которая рисует разные узоры). Идея Пейперта состояла в том, чтобы позволить детям самостоятельно, без всяких инструкций изучать компьютер через практический опыт. И все же эксперимент провалился: через несколько месяцев дети могли писать только небольшие, простые программы. Абстрактные понятия информатики ускользнули от них, и с тестом по решению задач они справились не лучше других: мизерная компьютерная грамотность, которую им удалось приобрести, не распространилась на другие области. Исследования показывают, что эксплицитное обучение с чередованием объяснений и практических проверок обеспечивает гораздо более глубинное понимание языка *Logo* и основ информатики.

Я лично был свидетелем рождения персонального домашнего компьютера – мне было пятнадцать лет, когда мой отец купил *Tandy TRS-80* с шестнадцатью килобайтами памяти и графикой 48x128 пикселей. Как и другие представители моего поколения, я учился программировать на языке BASIC самостоятельно, без учителя. Впрочем, я был не один: мы с братом читали все журналы и книги, которые только могли раздобыть. В конце концов я стал неплохим программистом... Только поступив в магистратуру по направлению «Информатика», я осознал чудовищные изъяны моей подготовки: как выяснилось, все это время я не только не понимал глубинной логической структуры программ, но и понятия не имел, как правильно их писать. Пожалуй, в этом и заключается самый главный недостаток научения через открытия: оно порождает иллюзию, будто вы овладели определенной темой, но не дает доступа к более глубинным понятиям и концепциям.

Хотя мотивация, активное вовлечение и заинтересованность крайне важны, это не означает, что ученики должны быть предоставлены сами себе. Неэффективность конструктивизма – лишнее доказательство того, что эксплицитное педагогическое руководство – важнейшее условие успешного научения. Задача учителя – организовать структурированную учебную среду, содействующую максимально быстрому прогрессу. Наиболее действенные методы обучения – это те, которые, с одной стороны, побуждают детей к активному вовлечению, а с другой – предполагают вдумчивое направление и помощь со стороны преподавателя. По мнению психолога Ричарда Майера, наибольший успех достигается за счет «методик, предполагающих когнитивную, а не поведенческую активность, методическое руководство, а не чистое открытие, ориентацию на учебную программу, а не бессистемное исследование»²⁶⁴. Успешные учителя придерживаются четкой и строгой последовательности в подаче материала и всегда начинают с азов. Они постоянно оценивают знания своих учеников и, двигаясь от простого к сложному, дают им возможность выстроить пирамиду смысла.

Именно так поступают большинство педагогов, вдохновленных Монтессори. В их классах дети не маются от безделья – им предлагают целый ряд рациональных и иерархических видов деятельности. Сначала то или иное действие демонстрирует учитель, и лишь затем дети выполняют его самостоятельно. Активное вовлечение, удовольствие и автономия вкупе с эксплицитным методом преподавания и стимулирующими педагогическими материалами – вот рецепт, эффективность которого была показана неоднократно.

Чистое научение через открытия – идея о том, что дети могут учить себя сами, – один из многочисленных педагогических мифов, которые были развенчаны, но остаются на удивление популярными. Данный миф принадлежит к собранию городских легенд,

существенно омрачающих образовательное поле, и связан по меньшей мере с двумя другими ключевыми заблуждениями²⁶⁵.

- Миф о цифровых аборигенах^[29]: в отличие от нас наши дети – прирожденные *Homo zappiens*^[30], чемпионы цифрового мира, для которых биты и байты абсолютно естественны. Они взаимодействуют с компьютерами и электроникой с самого раннего возраста, с невероятной легкостью ориентируются в виртуальной среде и без труда переключаются с одного цифрового носителя на другой. На самом деле, ничто не может быть дальше от истины: исследования показывают, что владение технологиями у таких детей часто носит поверхностный характер, а многозадачность дается им не лучше, чем любому из нас. (Как мы уже видели, неспособность делать две вещи одновременно является фундаментальным свойством архитектуры нашего мозга.)

- Миф о стилях научения: согласно этой идее, каждому ученику свойственен свой собственный стиль научения. Одни предпочитают зрительное представление информации, другие лучше воспринимают на слух, третьи быстрее учатся на практическом опыте и т.д. Если так, преподаватели должны адаптировать учебный материал с учетом излюбленной модальности каждого ученика. Очевидно, это тоже не соответствует действительности²⁶⁶: как ни странно, на сегодняшний день нет ни одного исследования, которое бы подтверждало существование выраженных различий в предпочтительных стилях научения. Конечно, некоторые стратегии преподавания работают лучше других, но они эффективны в обучении всех людей, а не только одной из подгрупп. Так, эксперименты показывают, что всем нам легче запомнить картинку, чем произнесенное слово, и что лучше всего мы запоминаем ту информацию, которая представлена в обеих модальностях одновременно (так называемый аудиовизуальный опыт). Опять же, это относится ко всем детям. Следовательно, делить их на подтипы в зависимости от стиля научения едва ли корректно. Нет никаких доказательств в пользу того, что детям типа А, например, больше подходит стратегия А, а детям типа Б – стратегия Б.

А как же быть со специальными учебниками и компьютерными программами, дающими возможность адаптировать учебный материал к потребностям каждого отдельного ребенка? Они бесполезны? Необязательно. Дети действительно отличаются друг от друга, но не по стилю научения, а по скорости, легкости и мотивации, с которой они учатся. Например, в первом классе 10% «отличников» прочитывают более четырех миллионов слов в год, 10% «отстающих» – менее шестидесяти тысяч²⁶⁷, а дети с дислексией могут не читать вообще. Поскольку нарушения развития, такие как дислексия и дискалькулия, проявляются по-разному, точная диагностика позволит соответствующим образом модифицировать систему обучения. Разумеется, адаптация уроков к конкретным потребностям учащихся идет только на пользу. Например, многие дети – даже те, которые занимаются математикой по углубленной программе, – не понимают, как работают дроби. В этом случае преподаватель обязан отступить от учебного плана и вернуться к основам – числам и арифметике. Вместе с тем каждый учитель должен отдавать себе отчет в том, что в основе всякого научения лежит один-единственный базовый механизм. Именно этот механизм – одинаковый для всех детей – определяет предпочтение сосредоточенному вниманию, а не двузадачности, активному вовлечению, а не пассивному слушанию лекций, подробному анализу ошибок, а не фальшивой похвале, эксплицитному преподаванию, а не конструктивизму или обучению через открытия.

Любопытство и как его разжечь

Все люди по природе своей жаждут знаний.

Аристотель, «Метафизика» (ок. 335 до н.э.)

У меня нет особых талантов, я всего лишь чрезвычайно любопытен.

Альберт Эйнштейн (1952)

Одной из основ активного вовлечения является любопытство – желание учиться, или жажда знаний. Если вам удалось разжечь любопытство ребенка, считайте, что полдела сделано. Как только его внимание будет мобилизовано, а ум начнет искать объяснение, все, что вам остается, – это направить поиски в нужное русло. Как показывают исследования, уже в дошкольном возрасте самые любознательные ученики лучше читают и считают²⁶⁸. Следовательно, любопытство – один из ключевых факторов успешного обучения. Но что такое любопытство? Какая дарвиновская сила его порождает, какому алгоритму оно соответствует?

В своем труде «Эмил, или О воспитании» Руссо пишет: «Любознательным становишься лишь по мере обучения». И здесь он снова ошибается: любознательность – это не результат обучения, это функция, которую мы должны приобрести. Любопытство присутствует в нас с самого раннего возраста и является неотъемлемой частью человеческого мозга, ключевым элементом нашего алгоритма научения. Мы не просто ждем, когда новая информация дойдет до нас, как это делает большинство современных искусственных нейросетей – простые функции ввода-вывода, пассивно подчиненные своей среде. Как заметил еще Аристотель, мы, люди, уже рождаемся с жаждой знаний и постоянно ищем новое, активно исследуя окружающий нас мир.

Любопытство – фундаментальное стремление организма: движущая сила, которая побуждает нас к действию точно так же, как голод, жажда, потребность в безопасности или желание размножаться. Какую роль оно играет в выживании? Исследовать окружающую среду с тем, чтобы лучше ее контролировать, в интересах большинства видов животных (млекопитающих, а также многих птиц и рыб). Согласитесь, весьма рискованно строить гнездо, логово, нору или дом, предварительно не проверив окрестности. В нестабильной вселенной, населенной хищниками, развитая любознательность – вопрос жизни и смерти; именно поэтому большинство животных регулярно обходят свою территорию, тщательно проверяют все необычное, изучают каждый новый звук и объект... Именно любопытство заставляет их выходить из зоны комфорта и гонит на поиски знаний. В неопределенном мире ценность информации высока, и живые существа платят за нее дарвиновской валютой – выживанием.

Таким образом, любопытство – та сила, которая побуждает нас исследовать окружающий мир. С этой точки зрения любопытство сродни потребности в пище или половом партнере, за исключением того, что оно мотивировано нематериальной ценностью – знаниями. И действительно, нейробиологические исследования показывают, что для нашего мозга ранее неизвестная информация есть награда сама по себе: она активизирует дофаминовую систему. Как мы помним, это нейронная сеть, которая срабатывает в ответ на еду, наркотики и секс. У приматов и, вероятно, у всех млекопитающих дофаминовая система реагирует не только на материальные блага, но и на новую информацию. Некоторые дофаминергические нейроны сигнализируют о возможном притоке информации в будущем, как будто само предвкушение новых знаний приносит удовольствие²⁶⁹. Благодаря данному механизму крысы могут выработать условную реакцию не только на пищу или наркотические вещества, но и на новизну. Например, они склонны предпочитать места, содержащие новые предметы и тем самым удовлетворяющие их любопытство, и избегать скучных мест, где никогда ничего не происходит²⁷⁰. По большому счету мы ведем себя точно так же, когда переезжаем в большой город, чтобы сменить обстановку, или лихорадочно листаем *Facebook* или *Twitter*, стремясь узнать последние новости.

Человеческая тяга к знаниям задействует дофаминовую систему даже тогда, когда обусловлена сугубо интеллектуальным любопытством. Представьте, что вы лежите в МРТ-сканере и вам задают вопросы типа «Кто был президентом Соединенных Штатов, когда Дядя Сэм^[31] впервые отрастил бороду?»²⁷¹. В конце концов экспериментатор удовлетворит ваше любопытство, но прежде обязательно спросит, как сильно вам хочется узнать правильный ответ. Иными словами, каковы нейрональные корреляты субъективного чувства любопытства? Степень заинтересованности тесно коррелирует с активностью нейронов прилежащего ядра и вентральной области покрышки – двух основных центров дофаминовой системы. Чем сильнее ваше любопытство, тем активнее эти области. Сигналы регистрируются уже на стадии предвкушения ответа: еще до того, как ваше любопытство будет удовлетворено, сам факт, что скоро вы узнаете ответ, возбуждает дофаминергические нейроны. Ожидание некоего положительного события – в данном случае ответа – есть вознаграждение само по себе.

Сигналы любопытства предсказывают, сколь многому вы научитесь в итоге. Память и любопытство взаимосвязаны: чем больше вы чем-то интересуетесь, тем выше вероятность, что вы это запомните. Иногда любопытство переносится и на смежные события: мы часто запоминаем сопутствующие детали, например лицо прохожего или человека, сообщившего нам ценную информацию. Иными словами, степень тяги к знаниям определяет легкость и прочность запоминания.

Благодаря дофаминовой сети удовлетворение желания учиться – или даже предвкушение такого удовлетворения – положительное подкрепление само по себе. Научение обладает внутренней ценностью для нервной системы. То, что мы называем любопытством, есть не что иное, как эксплуатация этой ценности. Как таковой наш вид, вероятно, уникален, ибо наделен непревзойденной способностью учиться. По мере гоминизации развивалась и наша способность представлять мир. Мы единственные животные, которые строят формальные теории мира на языке мышления. Наука стала нашей экологической нишей: *Homo sapiens* – единственный вид без определенной среды обитания, который может приспособиться к любой среде.

Будучи отражением наших необычайных способностей к научению, человеческая любознательность, кажется, возросла десятикратно. В ходе эволюции мы приобрели развитую форму любопытства – так называемую эпистемическую любознательность: чистое стремление к знаниям во всех областях, включая самые абстрактные. Как и другие млекопитающие, мы изучаем мир – посредством не только фактического движения, но и мысленных экспериментов. Если другие животные исследуют окружающее их физическое пространство, то человек исследует концептуальные миры. Кроме того, нашему виду присущи специфические эпистемические эмоции, подпитывающие нашу жажду знаний. Например, мы восхищаемся симметрией и чистой красотой математических моделей: умная теорема способна тронуть нас гораздо больше, чем плитка шоколада.

Немалую роль в процессе научения играет и веселье – еще одна эмоция, свойственная исключительно человеку. Мы смеемся, когда внезапно обнаруживаем, что одно из наших имплицитных предположений ошибочно, а значит, нам необходимо в корне пересмотреть имеющуюся ментальную модель. По мнению философа Дэна Деннетта, смех – это заразительная социальная реакция, возникающая всякий раз, когда мы привлекаем внимание друг друга к неожиданной информации²⁷². В самом деле, при прочих равных условиях смех в процессе научения, по-видимому, усиливает любопытство и содействует запоминанию²⁷³.

Желание знать как источник мотивации

Многие психологи пытались выявить алгоритм, лежащий в основе человеческого любопытства. В самом деле, понимай мы его лучше, нам, возможно, удалось бы получить власть над этим важным компонентом механизма научения и даже воспроизвести его в машине, которая будет имитировать человека, эдаком любопытном роботе.

Алгоритмический подход уже приносит свои плоды. Величайшие психологи, от Уильяма Джеймса до Жана Пиаже и Дональда Хебба, задумывались о природе умственных операций, лежащих в основе любознательности. По их мнению, любопытство – это непосредственное проявление детского стремления к познанию мира и построению его модели²⁷⁴. Любопытство возникает, как только наш мозг обнаруживает расхождение между тем, что мы уже знаем, и тем, что мы хотели бы знать, – т. е. потенциальную область научения. В любой заданный момент времени мы выбираем из различных доступных нам действий те, которые с наибольшей вероятностью позволят сократить пробел в знаниях и получить полезные сведения. Согласно этой точке зрения, любопытство напоминает кибернетическую систему, управляющую обучением, подобно регулятору Уатта, который, открывая или закрывая дроссельную заслонку на паровом двигателе, регулирует давление пара и поддерживает постоянную скорость. Любопытство – это регулятор мозга, задача которого – поддерживать постоянное давление научения и подталкивать нас к тому, чего мы пока не знаем, но могли бы узнать. Его противоположность – скука заставляет не только отворачиваться от того, что мы уже знаем, но и быстро терять интерес к области, которая, согласно нашему прошлому опыту, едва ли научит нас чему-то новому.

Данная теория объясняет, почему любопытство не связано со степенью неожиданности или новизны напрямую, а следует колоколообразной кривой²⁷⁵. Мы не проявляем интереса к

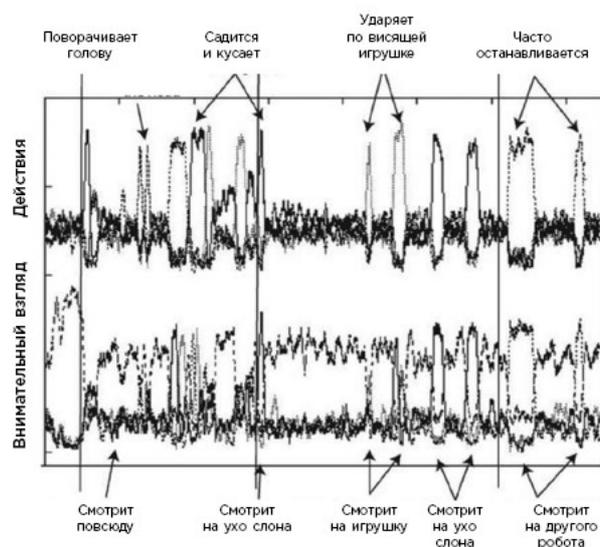
тому, что не вызывает удивления: вещи, которые мы видели тысячу раз, кажутся нам скучными. Равным образом нас не привлекают вещи, которые слишком новы и удивительны, а также вещи, которые настолько неоднозначны, что их структура остается за гранью нашего разумения, – сама их сложность отпугивает нас. Находясь посередине между скукой, вызванной излишней простотой, и отвращением к слишком сложному, любопытство естественным образом толкает нас к новым и доступным областям знаний. Однако степень их привлекательности постоянно меняется. По мере научения объекты, которые прежде казались интересными, теряют свое очарование, и мы перенаправляем внимание на новые явления. Вот почему младенцы поначалу проявляют такую страсть к самым тривиальным вещам: хватают пальцы ног, закрывают глаза, играют в «ку-ку»... Все для них ново; все является потенциальным источником научения. Однако стоит им выжать из этих экспериментов максимум знаний, как они теряют к ним всякий интерес – по той же самой причине, по которой ни один ученый не станет воспроизводить опыты Галилея: то, что уже известно, вызывает скуку.

Тот же алгоритм объясняет, почему иногда мы отворачиваемся от области, которая раньше представлялась привлекательной, но оказалась чересчур сложной. Наш мозг постоянно оценивает скорость научения; если он обнаруживает, что прогресс происходит недостаточно быстро, любопытство отключается. Все мы знаем детей, которые возвращаются с концерта с мечтой играть на скрипке, но через несколько недель отказываются от этой затеи, понимая, что овладение музыкальным инструментом дается нелегко. Те, кто продолжает играть, либо ставят перед собой более скромные задачи (например, с каждым днем играть все лучше и лучше), либо, если они действительно намерены стать профессиональными музыкантами, подпитывают стойкую мотивацию, с одной стороны – за счет родительской и социальной поддержки, а с другой – за счет постоянных напоминаний о конечной цели.

Два французских инженера, Фредерик Каплан и Пьер-Ив Удейе, создали любознательного робота²⁷⁶. Их алгоритм включает в себя несколько модулей. Первый – это классическая искусственная самообучающаяся система, которая непрерывно пытается предсказать состояние внешнего мира. Второй, более инновационный модуль оценивает работу первого: он измеряет скорость научения и использует ее для прогнозирования наименее изученных областей. Третий компонент – это схема подкрепления, обеспечивающая выбор действий, которые, как предполагается, приведут к более продуктивному научению. В результате система естественным образом сосредоточивается на тех областях, из которых можно извлечь максимум новых знаний. Последнее, согласно Каплану и Удейе, и есть само определение любознательности.

Если их любопытного робота посадить на детский коврик с игрушками, он ведет себя точно так же, как маленький ребенок. Несколько минут он занимается неким предметом: например, многократно поднимает ухо плюшевого слона. Как только он узнает все, что можно знать о предмете, его любопытство угасает. В какой-то момент робот отворачивается и активно ищет другой источник стимуляции. Через час он перестает исследовать коврик: наступает цифровая форма скуки – робот приходит к убеждению, что теперь ему известно все.

Аналогия с маленьким ребенком поразительна. Даже младенцы в возрасте нескольких месяцев поворачиваются в сторону стимулов средней сложности, структура которых подходит для быстрого усвоения. (Эта черта младенческого любопытства получила название «эффекта Златовласки»²⁷⁷.) Отсюда вывод: чтобы максимизировать научение, мы должны постоянно обогащать детскую среду новыми объектами, которые стимулируют, но не обескураживают. Задача взрослых состоит в том, чтобы обеспечить ребенка тщательно продуманной педагогической системой, которая содействует его развитию, постоянно стимулируя стремление к знаниям и новизне.



Любопытство – неотъемлемая составляющая нашего алгоритма научения, который мы только начинаем воспроизводить в машинах. Здесь маленький робот исследует игровой коврик. Любопытство реализуется через функцию подкрепления. Последняя содействует выбору того действия, которое максимизирует потенциал научения. Как следствие, робот последовательно пробует каждую игрушку на коврике и каждое действие, имеющееся в его распоряжении. Стоит ему овладеть одним аспектом мира, как он теряет к нему интерес и перенаправляет внимание на другой объект.

Данный подход к любопытству приводит к одному интересному предсказанию. В частности, он подразумевает следующее: чтобы дети оставались любознательными, они должны осознавать то, чего еще не знают. Другими словами, они должны обладать *метакогнитивными* способностями с самого раннего возраста. Метапознание – это познание познания: совокупность когнитивных систем высшего порядка, осуществляющих мониторинг наших психических процессов. Согласно вышеизложенной теории, метакогнитивные системы постоянно контролируют научение, определяя, что мы знаем и чего не знаем, ошибаемся мы или нет, быстры мы или медленны, и так далее и тому подобное. Иными словами, метапознание охватывает все, что мы знаем о нашей собственной психике.

Метапознание играет ключевую роль в любознательности. В самом деле, быть любознательным – значит хотеть знать, а если вы хотите знать – значит, вы знаете то, чего пока не знаете. Опять-таки, согласно недавним экспериментам, уже в возрасте одного года, если не раньше, дети понимают, что есть вещи, которые пока им не известны²⁷⁸. Так, малыши охотно обращаются к взрослому, когда не могут решить задачу в одиночку. Осознавая пробелы в собственных знаниях, они требуют больше информации. Таково раннее проявление эпистемической любознательности – непреодолимого желания знать.

Как школа убивает любознательность: три сценария

Все родители ностальгируют по тем временам, когда их малыш был преисполнен любопытства. В возрасте от двух до пяти лет детей интересует все на свете. Их любимое слово – «почему»: они никогда не перестают экспериментировать над внешним миром и задавать вопросы взрослым. Удивительно, но эта жажда знаний, которая кажется ненасытной, в конце концов угасает, часто после пары-тройки лет учебы в школе. Некоторые дети сохраняют любознательность, но многие утрачивают всякий интерес к познанию. Их активное вовлечение превращается в тупую пассивность. Может ли наука о любопытстве объяснить причины? У нас пока нет всех ответов, но я хотел бы предложить несколько гипотез.

Во-первых, дети могут утратить любознательность из-за отсутствия когнитивной стимуляции, адаптированной к их потребностям. Согласно алгоритму, который мы только что описали, с течением времени любопытство сходит на нет, и это совершенно нормально. По мере научения ожидаемый прирост знаний уменьшается: чем лучше мы владеем той или иной областью, тем меньше она нас интересует. Таким образом, для поддержания любознательности школы обязаны непрерывно снабжать мозг детей стимулирующей информацией, соответствующей уровню развития их интеллекта. К несчастью, это не всегда так. В типичном классе наиболее способным ученикам часто не хватает стимуляции, и через несколько месяцев от их прежнего любопытства не остается и следа: метакогнитивная система подсказывает им, что от школы, к сожалению, многого ждать не приходится.

На другом конце спектра находятся ученики, которым учеба дается нелегко. Любознательность этих детей может ослабнуть по противоположной причине. Главным виновником по-прежнему остается метапознание: через некоторое время такой ребенок приходит к выводу, что те или иные дисциплины – не его конек. Прошлый опыт запечатлел простое (хотя и ложное) правило в глубинах его метакогнитивных путей: *я не способен к такому-то или такому-то предмету* (математике, чтению, истории, чему угодно). Это явление не редкость: многие девочки убеждены, что математика не для них²⁷⁹, а дети из неблагополучных семей считают, что школа – враждебная среда, которая не учит ничему такому, что пригодилось бы в будущем. Такие метакогнитивные суждения крайне опасны: они демотивируют учащихся и убивают любознательность еще в зародыше.

Решение состоит в том, чтобы шаг за шагом вернуть этим детям уверенность в себе: показать им, что они способны учиться ничуть не хуже других (при условии что материал соответствует их уровню) и что научение есть вознаграждение само по себе. Теория любопытства гласит, что, когда дети демотивированы и разочарованы, будь то отличники или неуспевающие, самое главное – вновь разжечь в них желание учиться. В основном это достигается посредством стимулирующих задач, тщательно подобранных с учетом их текущих потребностей. Как только ученики заново откроют для себя радость познания, а метакогнитивная система убедится, что учиться *могут* все, любознательность вернется!

Другой сценарий, который может привести к потере интереса у детей, – это практика не поощрять, а наказывать любопытство. Чрезмерно жесткая педагогическая стратегия способна уничтожить жажду открытий в два счета. Традиционные лекции, как правило, не предполагают активного вовлечения или даже мышления со стороны слушателей. В результате многие дети приходят к заключению, что они должны просто сидеть на своих местах и молчать до конца урока. Нейрофизиологическая интерпретация этой ситуации проста: внутри дофаминовой системы сигналы подкрепления, вызываемые любопытством и его удовлетворением, конкурируют с внешними вознаграждениями и наказаниями. Следовательно, учитель, который пресекает любые попытки самостоятельного исследования, рискует надолго отбить любопытство у своих учеников. Представьте ребенка, которого систематически отчитывают, высмеивают или наказывают: «Глупый вопрос. Тебе лучше помолчать, а не то я выгоню тебя из класса...» Такой ученик быстро учится подавлять свое любопытство и перестает участвовать в уроке: вознаграждение, которого ожидает дофаминовая система – удовольствие от изучения чего-то нового, – в значительной степени блокируется прямыми негативными сигналами. Многократное наказание приводит к приобретенной (выученной) беспомощности, своего рода физическому и психическому параличу, ассоциированному со стрессом и тревогой, которые, как было показано, тормозят научение у животных²⁸⁰.

Выход? Большинство учителей и так его знают. Достаточно поощрять любознательность, а не наказывать за нее: побуждать детей задавать вопросы (какими бы «глупыми» они ни казались), просить сделать презентацию по любимому предмету, вознаграждать проявленную

инициативу... Нейробиология мотивации предельно ясна: желание совершить действие X должно быть связано с ожидаемой наградой, материальной (еда, комфорт, социальная поддержка) или когнитивной (получение информации). Слишком многие дети утрачивают любопытство, ибо не ждут от школы никаких наград вообще. (Отметки, о которых мы поговорим в следующей главе, лишь усугубляют эту печальную тенденцию.)

Третий фактор, который может отбить всякое любопытство, – это социальная передача знаний. Помните, что человеку свойственны два режима научения: активный, когда дети постоянно экспериментируют и задают себе вопросы, как настоящие ученые, и рецептивный, когда они просто запоминают то, чему их учат другие. Зачастую школа поощряет только второй режим, а он может препятствовать первому – особенно если дети уверены, что учителя все знают лучше учеников.

Может ли отношение учителя действительно убить естественное любопытство ребенка?²⁸¹ К сожалению, недавние эксперименты показывают, что да. В своей лаборатории в Массачусетском технологическом институте, изучая механизмы познания у детей, американский психолог Лора Шульц предлагает дошкольникам странное приспособление – набор пластиковых трубок с всевозможными неожиданными игрушками внутри: зеркалами, рожками, лампочками, музыкальными шкатулками. Когда вы даете такое устройство детям, но ничего про него не говорите, вы возбуждаете их любопытство: они увлеченно исследуют и ищут, пока не найдут большую часть скрытых наград. Теперь возьмите новую группу детсадовцев и переведите их в пассивный, рецептивный режим. Все, что вам нужно, – это взять предмет и сказать: «Позвольте я покажу вам мою игрушку. Вот что она делает...» – а потом, например, открыть музыкальную шкатулку. Можно подумать, что такое поведение должно стимулировать любопытство, но на самом деле оно имеет противоположный эффект. Судя по всему, дети полагают (часто небезосновательно), что учитель старается им помочь и поэтому заранее знакомит со всеми интересными функциями устройства. В таком контексте нет необходимости искать: любопытство подавлено.

Другие эксперименты показывают, что дети учитывают предыдущее поведение учителя. Если взрослый постоянно прибегает к исчерпывающим демонстрациям, малыши не проявляют любопытства. Если учитель демонстрирует одну из функций новой игрушки, ученики не исследуют все ее возможности: они уверены, что учитель уже объяснил все, что нужно знать. Если же, наоборот, взрослый дает понять, что не всегда знает все, дети активно исследуют новый предмет.

Итак, каков же правильный подход? Я призываю всегда помнить о концепции активного вовлечения. Максимально задействовать интеллект ребенка – значит постоянно подкармливать его вопросами и замечаниями, которые стимулируют воображение и вызывают желание узнать еще больше. Не может быть и речи о том, чтобы позволить ученикам все открывать самостоятельно, – так мы снова попадем в ловушку обучения через открытия. Идеальный сценарий состоит в том, чтобы обеспечивать структурированное руководство и одновременно поощрять креативность. Как? Дать детям понять, что есть еще тысяча вещей, которые они могут открыть самостоятельно. Как-то раз перед летними каникулами один учитель сказал мне: «Знаешь, я только что наткнулся на математическую задачку, которую не могу решить...» Мечтая превзойти учителя, я размышлял над ней все лето.

Мобилизация активного вовлечения детей идет рука об руку с другой важной функцией учителя – работой над ошибками. Хороший педагог относится к ошибкам терпимо, но старается исправить их как можно быстрее. Это наш третий столп успешного научения.

Глава 9

Обратная связь

Каждый должен научиться совершать ошибки...

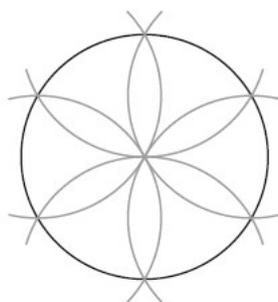
Мыслить – значит двигаться от одной ошибки к другой.

Ален, «Об образовании» (1932)

Никогда не ошибается тот, кто ничего не делает.

Приписывается Теодору Рузвельту (1900)

В 1940 году Александру Гротендику (1928–2014) было всего одиннадцать или двенадцать лет. Тогда он еще не знал, что станет одним из самых влиятельных математиков двадцатого века и вдохновит целое поколение. (Его революционные идеи сыграли ключевую роль в создании в 1958 году знаменитого французского Института высших научных исследований, в стенах которого трудились более дюжины лауреатов Филдсовской премии.) Но юный Александр уже занимался математикой... с переменным успехом. Вот отрывок из его мемуаров:



Примерно в возрасте одиннадцати-двенадцати лет, будучи заключенным в концентрационном лагере Рьекро (близ Манда), я открыл для себя игры с циркулем. Я был буквально очарован розетками, которые получаются, когда делишь круг на шесть равных частей, поворачивая циркуль шесть раз по окружности и возвращаясь прямым к исходной точке. Это экспериментальное наблюдение убедило меня, что длина окружности ровно в шесть раз больше радиуса. Когда позже... я увидел в учебнике, что связь намного сложнее, что у нас есть $L = 2\pi R$ и что $\pi = 3,14...$ я был уверен, что книга не права, что ее авторы... должно быть, ничего не знали об этом простом упражнении с циркулем, которое ясно показывает, что $\pi = 3$.

Уверенность ребенка в правильности своих выводов, вера в собственные способности и отказ безоговорочно принимать то, что говорят в школе или написано в учебнике, дорогого стоят. И все же эту уверенность никогда не поощряют.

Многие увидят в только что приведенном мною опыте пример ребяческой дерзости, позже вынужденной склониться перед новым знанием, – ситуация, граничащая с нелепостью. Однако в то время у меня не было чувства разочарования или нелепости, лишь ощущение того, что я совершил подлинное открытие... Я открыл ошибку²⁸².

Какое невероятное откровение и какой урок смирения – подумать только, один из величайших математиков мира признает, что совершил колоссальную ошибку, полагая, будто число π равно трем... И все же в одном Гротендик был совершенно прав: ошибки играют ключевую роль в научении. Совершать ошибки – самый естественный способ учиться. Эти два термина практически синонимичны, ибо каждая ошибка дает возможность узнать нечто новое.

Французский мультфильм «Шадюки», популярный во времена моего детства, возвел эту концепцию в ранг общего принципа: «У того, кто не оставляет попыток, рано или поздно все получится... Иными словами, чем больше неудач, тем больше шансов на успех!» Шансы на то, что ракета, которую пытались запустить Шадюки, взлетит, не превышали один на миллион, а потому они быстренько провалили первые 999 999 попыток, но в конце концов все-таки добились своего.

Если серьезно, прогресс невозможен без неудач. Со временем количество ошибок постепенно уменьшается – разумеется, при условии, что мы получаем обратную связь, которая подсказывает нам, как улучшить результат. Вот почему обратная связь служит третьим столпом научения и одним из наиболее важных параметров в образовании: именно от качества и точности получаемой обратной связи зависит, насколько быстро мы учимся²⁸³.

Удивление – движущая сила научения

Помните алгоритмы научения из первой главы, которые позволяют охотнику отрегулировать оптический прицел ружья, а искусственной нейронной сети – настроить скрытые веса? Идея проста: сначала вы пробуете, даже если попытка заведомо окончится провалом, а затем, исходя из величины ошибки, вычисляете, как улучшить результат в следующий раз. Так, охотник целится, стреляет, оценивает, насколько сильно он промахнулся, и использует эту обратную связь для корректировки следующего выстрела. Именно так снайперы пристреливают свои винтовки – и именно так, только в большем масштабе, искусственные нейронные сети корректируют миллионы параметров, определяющих их внутренние модели внешнего мира.

Мозг работает так же? Уже в 1970-х годах появились первые данные в пользу этой теории^[32]. Два американских исследователя, Роберт Рескорла и Аллан Вагнер, выдвинули следующую гипотезу: мозг учится только в том случае, если замечает разрыв между тем, что он прогнозирует, и тем, что он получает в итоге. Никакое научение невозможно без сигнала ошибки: «Организмы учатся только тогда, когда события не совпадают с их ожиданиями»²⁸⁴. Другими словами, удивление является одной из фундаментальных движущих сил научения.

Теория Рескорлы—Вагнера прекрасно объясняет детали такой парадигмы научения, как «классическое обусловливание». Все слышали о собаке Павлова. В павловских экспериментах по обусловливанию собака слышит звон колокольчика, который изначально является нейтральным и неэффективным стимулом. Однако после многократного сочетания с пищей тот же колокольчик вызывает условный рефлекс. Всякий раз, когда собака слышит колокольчик, у нее начинается обильное слюноотделение: она усвоила, что этот звук систематически предшествует появлению пищи. Как теория объясняет это явление? Правило Рескорлы—Вагнера предполагает, что мозг использует сенсорные сигналы (ощущения, генерируемые колокольчиком) для прогнозирования вероятности последующего стимула (пищи). Система работает следующим образом.

- Мозг генерирует прогноз, вычисляя взвешенную сумму поступающих сенсорных сигналов.
- Мозг вычисляет разницу между этим прогнозом и реальным стимулом, который он получил; *ошибка прогноза*, фундаментальное понятие теории, определяет степень неожиданности, ассоциированную с каждым стимулом.
- Мозг использует неожиданный сигнал для коррекции внутренней репрезентации: внутренняя модель изменяется прямо пропорционально силе стимула и величине ошибки прогнозирования. Правило гарантирует, что следующее предсказание будет ближе к реальности.

Данная теория уже содержит все семена наших трех столпов обучения: научение происходит только в том случае, если мозг отбирает соответствующие сенсорные сигналы (внимание), использует их для формулирования прогноза (активное вовлечение) и оценивает точность прогноза (обратная связь).

Уравнение, предложенное Рескорлой и Вагнером в 1972 году, оказалось на удивление прозорливым. Оно практически идентично «дельта-правилу», которое позже применялось в искусственных нейронных сетях. Оба представляли собой упрощенные версии правила

обратного распространения ошибки, которое сегодня используется практически во всех современных системах обучения с учителем (сети дается эксплицитная обратная связь относительно верного ответа). Аналогичное уравнение до сих пор работает и в обучении с подкреплением (сети просто говорят, насколько она ошиблась): система прогнозирует вознаграждение и на основе разницы между своим прогнозом и фактическим вознаграждением обновляет внутреннюю репрезентацию.

Следовательно, можно утверждать, что современные кремниевые машины опираются на уравнения, непосредственно вдохновленные нейробиологией. Как мы видели выше, человеческий мозг идет еще дальше: чтобы извлечь максимум информации из каждого учебного эпизода, он использует язык мышления и статистические модели, гораздо более совершенные, чем современные искусственные нейросети. Однако основная идея Рескорлы и Вагнера остается верной: мозг пытается предсказать входные сигналы, которые он получает, и корректирует эти предсказания в соответствии со степенью неожиданности, маловероятности или ошибки. Учиться – значит уменьшать непредсказуемость.

Теория Рескорлы и Вагнера оказала сильное влияние на науку, ибо представляла собой важный шаг вперед по сравнению с предыдущими теориями, основанными на концепции ассоциативного обучения. В прошлом считалось, что мозг просто учится ассоциировать звон колокольчика с едой, а не прогнозировать одно на основе другого. Согласно данной точке зрения, мозг регистрирует все совпадения между стимулами и реакциями сугубо пассивным образом. Однако даже в случае павловского обусловливания этот подход явно ошибочен²⁸⁵. Мозг собаки – не пассивный орган, который просто впитывает ассоциации. Научение представляет собой активный процесс и зависит от степени удивления, вызванного нарушением наших ожиданий.

Явление блокировки – одно из самых эффектных опровержений ассоцианистской точки зрения²⁸⁶. В экспериментах с блокировкой животному предлагают два сенсорных ключа, предсказывающих скорое появление пищи: скажем, звон колокольчика и свет. Фокус в том, что они предъявляются последовательно. Мы начинаем со света: животное понимает, что всякий раз за зажиганием света следует появление пищи. После этого мы вводим двойные испытания, в которых пищу предсказывают и свет, и звон колокольчика. Наконец, мы проверяем действие одного колокольчика. Сюрприз: он не дает эффекта – вообще! Услышав звон, животное не выделяет слюну; оно, кажется, совершенно не замечает повторяющейся связи между колокольчиком и пищей. Что же произошло? Это открытие несовместимо с ассоцианизмом, зато отлично согласуется с теорией Рескорлы—Вагнера. Ключевая идея в том, что заучивание первой ассоциации (свет и пища) блокирует вторую (колокольчик и пища). Почему? Потому что прогноза, основанного только на свете, достаточно, чтобы объяснить все. Животное уже знает, что свет предсказывает пищу, а потому его мозг не генерирует никакой ошибки прогноза во время второй части теста, где о скором появлении пищи сигнализируют и свет, и звон. Ноль ошибок – ноль научения: собака не приобретает никаких знаний об ассоциации между звуком и едой. Какое бы правило ни было усвоено первым, оно блокирует усвоение второго.

Этот эксперимент с блокировкой ясно свидетельствует о том, что научение не работает по принципу ассоциаций. В конце концов, сочетание «звон колокольчика – пища» повторялось сотни раз, но условная реакция так и не сформировалась. Кроме того, эксперимент показывает, что в отсутствие удивления никакого научения не происходит: важнейшим условием научения является ошибка прогноза – по крайней мере у собак. Впрочем, имеющиеся на сегодняшний день данные говорят о том, что системы ошибок прогноза присутствуют в мозге всех видов животных.

Важно понимать, что сигнал ошибки, о котором мы говорим, – это *внутренний* сигнал, который распространяется в мозге. Нам не нужно совершать фактические ошибки, чтобы учиться; достаточно заметить несоответствие между тем, что мы ожидали, и тем, что получили в итоге. Рассмотрим простой двоичный выбор – скажем, какое второе имя Пабло Пикассо: Диего или Родриго? Предположим, мне повезло высказать верную догадку с первой попытки (Диего; полное имя Пабло Пикассо – Пабло Диего Хосе Франсиско де Паула Хуан Непомусено Мария де лос Ремедиос Сиприано де ла Сантисима Тринидад Мартир Патрисио Руис и Пикассо). Научусь ли я чему-нибудь? Конечно. Даже при том, что я сразу ответил правильно, моя уверенность была низкой. Шансы, что я окажусь прав, составляли 50 на 50. Поскольку я не был уверен, полученная обратная связь дала мне новую информацию: она убедила меня, что мой случайно выбранный ответ на самом деле

правильный на 100%. Согласно правилу Рескорлы—Вагнера, эта новая информация генерирует сигнал ошибки, который описывает разрыв между тем, что я предсказал (50%-ная вероятность оказаться правым), и тем, что я знаю теперь (100%-ная уверенность в знании правильного ответа). Распространяясь в моем мозге, сигнал ошибки уточняет мои знания, тем самым увеличивая мои шансы ответить «Диего» в следующий раз, когда меня об этом спросят. Следовательно, было бы неверно полагать, что для научения важно совершать много ошибок (хотя Шадоки, провалившие первые 999 999 запусков своей ракеты, едва ли с этим согласятся). Что действительно важно, так это получить эксплицитную обратную связь, которая позволит снизить неуверенность.

Нет удивления – нет научения; на сегодняшний день установлено, что этому базовому правилу следуют все организмы, включая маленьких детей. Как вы помните, удивление является одним из основных индикаторов ранних навыков ребенка: например, он гораздо дольше смотрит на предметы, нарушающие законы физики, арифметики, вероятностей или психологии (см. рисунок в главе 3, раздел «Понятие о физических объектах», а также цветную иллюстрацию 5). Но дети не просто с удивлением глазят на происходящее: они явно учатся.

Перед тем как прийти к этому выводу, американский психолог Лиза Фейгенсон провела целую серию экспериментов. Эти эксперименты показали, что всякий раз, когда дети воспринимают какое-либо событие как невозможное или невероятное, запускается механизм научения²⁸⁷. Например, когда младенцы видят, как некий предмет таинственно проходит сквозь стену, они смотрят на это немыслимое действие... и впоследствии лучше помнят звук, который он при этом издавал, или даже глагол, который взрослый использовал для описания происходящего («Смотри, я только что бликнул игрушку»). Если дать этот предмет малышу, он будет играть с ним гораздо дольше, чем с аналогичной игрушкой, которая законов физики не нарушала. Поведение ребенка – на первый взгляд игривое и несерьезное – в действительности показывает, что он активно пытается сообразить, что произошло. Подобно маленьким ученым, младенцы пытаются воспроизвести увиденное и ставят эксперименты. Например, если некий предмет только что прошел сквозь стену, они ударят по нему, чтобы проверить твердость; если он нарушает законы гравитации и таинственным образом висит в воздухе, они сбросят его со стола, чтобы проверить способность к левитации. Другими словами, именно характер наблюдаемого явления определяет, как впоследствии поступит ребенок, чтобы скорректировать свои гипотезы. В точности то же самое предсказывает и теория обратного распространения ошибки: каждое неожиданное событие приводит к соответствующей корректировке внутренней модели мира.

Все эти явления были зафиксированы у одиннадцатимесячных младенцев, но, вероятно, присутствуют и в более раннем возрасте. Научение путем коррекции ошибок широко распространено в животном мире, и есть все основания полагать, что сигналы ошибки управляют научением с рождения.

Мозг кишит сообщениями об ошибке

Сигналы ошибки играют столь фундаментальную роль в научении, что их передают практически все области мозга (см. цветную иллюстрацию 17)²⁸⁸. Рассмотрим элементарный пример: представьте, что вы слышите последовательность одинаковых нот, *ЛЯ ЛЯ ЛЯ ЛЯ ЛЯ*. Каждая нота вызывает активность в слуховых областях вашего мозга, однако по мере того, как ноты повторяются, ответ постепенно затухает. Это называется «адаптацией». Адаптация – обманчиво простое явление, которое показывает, что ваш мозг учится предсказывать следующее событие. Внезапно ноты меняются: *ЛЯ ЛЯ ЛЯ ЛЯ ЛЯ-диез*. Ваша первичная слуховая кора мгновенно демонстрирует выраженную реакцию удивления: в ответ на неожиданный звук возбуждаются не только те клетки, которые срабатывали прежде, но и дополнительные нейроны. Примечательно, что к адаптации ведет не только повторение: главное – предсказуемость нот. Например, если вы слышите чередующийся набор нот – допустим, *ЛЯ СИ ЛЯ СИ ЛЯ*, – ваш мозг привыкает к этому чередованию, и активность в слуховых областях снова уменьшается. В этом случае реакцию удивления вызовет неожиданное повторение – скажем, *ЛЯ СИ ЛЯ СИ СИ*²⁸⁹.

Слуховая кора, по-видимому, выполняет простые вычисления: она использует недавнее прошлое для предсказания будущего. Как только нота или группа нот повторяется, эта область приходит к выводу, что так будет продолжаться и впредь. Это важно, ибо помогает

нам не обращать слишком много внимания на скучные, предсказуемые сигналы. Любой повторяющийся звук заглушается на входной стороне: точный прогноз подавляет соответствующую активность. Пока входной сенсорный сигнал совпадает с прогнозом, генерируемым мозгом, разница равна нулю, и сигнал ошибки не передается в области более высокого уровня. Таким образом, предсказание отключает входные сигналы – но только до тех пор, пока они предсказуемы. Любой звук, который не согласуется с ожиданиями мозга, наоборот, усиливается. В этом плане слуховая кора действует как фильтр: она передает в высшие уровни коры только удивительную и непредсказуемую информацию, которую не может объяснить сама.

Следовательно, любая входящая информация, которую не может объяснить та или иная область мозга, передается на следующий, более высокий уровень. Мы можем представить себе кору как массивную иерархию прогностических систем, каждая из которых пытается объяснить входящие сигналы и обменивается сообщениями об ошибках с другими отделами в надежде, что они добьются лучших результатов.

Например, последовательность *Ci Ci Соль* генерирует низкоуровневый сигнал ошибки в слуховой коре, поскольку конечная *Соль* отличается от двух предыдущих нот. Области более высокого уровня, однако, могут распознать в этой последовательности известную мелодию (начало английской колыбельной *Twinkle, Twinkle, Little Star*^[33]). В результате удивление, вызванное последней *Соль*, носит временный характер: его быстро объясняет репрезентация всей мелодии на более высоком уровне, и сигнал ошибки не передается дальше; новая нота *Соль* не вызывает удивления в нижней префронтальной коре, которая может кодировать целые музыкальные фразы.

Повторение *Ci Ci Ci* будет иметь противоположный эффект: в силу своей монотонности оно не генерирует никакого сигнала ошибки в низших слуховых областях, зато вызывает удивление в областях более высокого уровня, кодирующих мелодию и предсказавших *Соль*, а не *Ci*. И это не удивительно! Даже у макак обработка слуховой информации включает два уровня: локальную обработку отдельных нот в слуховой коре и глобальное представление мелодии в префронтальной коре²⁹⁰.

Сигналы ошибки, подобные этим, по-видимому, присутствуют во всех областях мозга. Нейроны коры адаптируются к повторяющимся и предсказуемым событиям и реагируют усиленным разрядом всякий раз, когда происходит нечто неожиданное. Единственное, что меняется от одного участка к другому, – тип противоречия, которое может быть обнаружено. В зрительной коре всплеск активности вызывают неожиданные образы²⁹¹. Речевые центры реагируют на необычные слова в предложении. Возьмем, к примеру, следующее предложение:

Я предпочитаю есть вилок и верблюдом.

Ваш мозг только что испустил волну N400 – сигнал ошибки, вызванный словом или изображением, несовместимым с предыдущим контекстом²⁹². Как следует из самого названия, это отрицательный отклик, который регистрируется примерно через четыреста миллисекунд после аномалии и зарождается в популяциях нейронов левой височной доли, чувствительных к значению слова. Зона Брока в нижней префронтальной коре реагирует на синтаксические ошибки – например, когда мозг предсказывает определенную категорию слов, а получает другую²⁹³, как в следующем предложении:

Принимайте плохо лекарство, как только почувствуете себя.

Сразу после неожиданного слова «плохо» области вашего мозга, специализирующиеся на синтаксисе, испустили отрицательную волну, за которой немедленно последовала волна P600 – положительный пик, возникающий примерно через шестьсот миллисекунд. Этот ответ говорит о том, что ваш мозг обнаружил грамматическую ошибку и пытается ее исправить.

На сегодняшний день лучше всего изучены прогностические сигналы и сигналы ошибки в так называемой системе вознаграждения²⁹⁴. Дофаминовая сеть не только реагирует на

фактические вознаграждения, но и постоянно их превосходит. Дофаминергические нейроны, расположенные в небольшом скоплении клеток под названием «вентральная область покрышки», не просто чувствительны к удовольствию от секса, пищи или питья; они сигнализируют о расхождении между ожидаемым вознаграждением и полученным, т.е. об ошибке прогноза. Так, если животное получает награду без всякого предупреждения – скажем, неожиданную каплю подслащенной воды, – то этот приятный сюрприз приводит к нейронному возбуждению. Но если этой награде предшествует предсказывающий ее сигнал, тот же сладкий сироп не вызывает реакции. Теперь уже сам сигнал порождает всплеск активности в дофаминовых нейронах: научение сдвигает ответ ближе к сигналу, предсказывающему вознаграждение.

Благодаря данному прогностическому механизму произвольные сигналы могут стать носителями вознаграждения и возбуждать дофаминовые нейроны. Этот вторичный эффект вознаграждения был продемонстрирован на примере денег у здоровых людей и одного вида шприца у наркоманов. В обоих случаях мозг превосходит будущие награды. Как мы видели в главе 1, такой прогностический сигнал чрезвычайно полезен для научения, ибо позволяет системе критиковать себя и предвидеть успех или неудачу, не дожидаясь внешнего подтверждения. Именно поэтому архитектуры «актер—критик», в которых одна искусственная нейронная сеть учится критиковать действия другой, сегодня повсеместно используются в искусственном интеллекте для решения самых сложных задач, таких как игра в го. Генерирование прогноза, обнаружение ошибки и самокоррекция – основы эффективного научения.

Обратная связь по ошибкам не синонимична наказанию

Меня всегда поражал тот факт, что преподаватели естественных наук – порой даже больше, чем другие учителя, – не могут понять, что их ученики могут не понимать. Лишь единицы всерьез задумываются на тему ошибок, невежества и ротозейства.

Гастон Башляр, «Становление научного духа» (1938)

Как же извлечь максимум пользы из сигналов ошибки, которыми постоянно обмениваются наши нейроны? Чтобы ребенок или взрослый учился эффективно, его окружение (будь то родители, школа, университет или просто видеоигра) должно обеспечивать быструю и точную обратную связь. Научение происходит быстрее и легче, если учащиеся знают, где они оступились и что нужно было сделать на самом деле. Предоставляя быструю и четкую обратную связь по ошибкам, учителя существенно обогащают информацию для самокоррекции, доступную их ученикам. В сфере искусственного интеллекта данный тип обучения – контролируемое обучение или обучение с учителем – считается наиболее эффективным, поскольку позволяет машине быстро идентифицировать источник сбоя и внести соответствующие поправки.

Тем не менее важно понимать, что такая обратная связь по ошибкам не имеет ничего общего с наказанием. Мы не наказываем искусственную нейронную сеть, мы просто сообщаем ей, что она ответила неправильно. Мы даем ей максимально информативный сигнал, который бит за битом уведомляет ее о характере допущенных ошибок.

В этом отношении компьютерная наука и педагогика воистину смотрят в одну сторону. В самом деле, метаанализ, проведенный австралийским педагогом Джоном Хэтти, показывает, что качество обратной связи, которую получают учащиеся, является одной из детерминант их академической успеваемости²⁹⁵. Постановка четкой цели обучения и поэтапное приближение к ней без драматизации неизбежных ошибок – вот главный ключ к успеху.

Хорошие учителя знают об этом уже давно. Каждый день они убеждаются в верности римского *errare humanum est* – людям свойственно ошибаться. Они с состраданием и доброжелательностью смотрят на ошибки своих учеников, ибо понимают: тому, кто учится, ошибок не избежать. Они знают, что должны беспристрастно диагностировать проблему, с которой столкнулись их подопечные, и помочь им найти наилучшее решение. С опытом такие педагоги составляют свой собственный каталог ошибок, ибо все ученики попадают в одни и те же старые ловушки. Эти учителя находят правильные слова, чтобы утешить, подбодрить и

восстановить уверенность в себе своих учеников, одновременно позволяя им исправить их ошибочные ментальные репрезентации. Их задача – говорить правду, а не судить.

Конечно, самые рациональные из вас могут возразить: «Разве это не одно и то же? Разве сказать ученикам, что они должны были сделать то-то и то-то, не то же самое, что сказать им: “Вы не правы”»? Не совсем так. С чисто логической точки зрения – конечно. Если вопрос имеет только два возможных ответа, А или Б, и ученик выбирает неправильный ответ А, сказать: «Правильный ответ – это Б» – то же самое, что сказать: «Ты ошибаешься». Согласно той же логике, в бинарном выборе пятьдесят на пятьдесят фраза «Ты прав» и «Ты не прав» должна приводить к строго эквивалентным объемам новых знаний. Однако не будем забывать, что дети – не самые лучшие логики. Для них дополнительный вывод «Если я выбрал А и ошибся, значит, правильный ответ Б» очевиден не сразу. Зато они без труда улавливают главный посыл: «Я напортачил». На самом деле, эксперимент показал: взрослые успешно извлекали равное количество информации из вознаграждения и наказания, а подростки гораздо лучше учились на своих успехах, чем на неудачах²⁹⁶. Так почему бы не избавить их от этого стресса и не предоставлять максимально нейтральную и информативную обратную связь? Обратную связь по ошибкам не следует путать с наказанием.

Отметки – плохой аналог обратной связи по ошибкам

Теперь я должен сказать несколько слов об институте, который полон изъянов и все же столь глубоко укоренен в традициях, что нам трудно представить школу без него: разумеется, я говорю об отметках. Согласно теории научения, отметка – это всего-навсего сигнал вознаграждения (или наказания!). Один из ее очевидных недостатков заключается в том, что она напрочь лишена точности. Отметка, полученная на экзамене, обычно представляет собой простую сумму и как таковая подытоживает различные источники ошибок, не разграничивая их. Посему отметка недостаточно информативна: сама по себе она ничего не говорит о том, *почему* мы допустили ошибку, или о том, *как* ее исправить. В самом крайнем случае двойка, которая остается двойкой, дает нулевую информацию – если не считать четкого социального клейма некомпетентности.

Посему одни только отметки, если они не сопровождаются подробными и конструктивными оценками, служат плохим источником обратной связи по ошибкам. Они не только неточны, но и часто становятся известны через несколько недель, когда большинство учащихся давно позабыли, какие аспекты внутренних рассуждений ввели их в заблуждение.

Кроме того, отметки могут быть в корне несправедливыми, особенно если речь идет об учащихся, которые не успевают за остальными, поскольку уровень сложности контрольных работ только возрастает. Проведем аналогию с видеоиграми. Запуская новую игру, вы понятия не имеете, какая тактика будет наиболее эффективной. Тем не менее вы не хотите, чтобы вам постоянно напоминали о том, что ничегошеньки у вас не получается! Чтобы этого не произошло, разработчики начинают с простых уровней, которые вы почти наверняка пройдете. Шаг за шагом сложность увеличивается, а вместе с ней – риск неудачи и разочарования. К счастью, программисты об этом знают: они смешивают легкое с трудным и разрешают проходить один и тот же уровень столько раз, сколько нужно. Вы видите, что количество очков неуклонно растет... и, наконец, наступает тот радостный день, когда вы успешно проходите финальный уровень, на котором «сидели» так долго. Теперь сравните это с табелями успеваемости «плохих» учеников: они начинают год с плохой отметки, но, вместо того чтобы повысить их мотивацию и разрешить пересдать материал, учитель дает им новые проверочные каждую неделю. Разумеется, почти все последующие контрольные выходят за рамки их возможностей. Неделя за неделей «счет» двоечников приближается к нулю. На рынке видеоигр такой геймдизайн обернулся бы полным провалом.

Зачастую школы используют плохие отметки в качестве наказания. Мы не можем игнорировать их мощнейшее негативное влияние на эмоциональные системы мозга: обескураженность, стигматизацию, чувство беспомощности... Прислушаемся к голосу профессионального двоечника – Даниэля Пеннака, ныне очень популярного французского писателя, в 2007 году получившего знаменитую премию Ренодо за книгу «Школьные страдания»:

Мои школьные табели подтверждали это каждый месяц: если я и был идиотом, то только по собственной воле. Отсюда ненависть к себе, комплекс неполноценности и прежде всего чувство вины... Я считал себя ничтожеством. Потому что непутевый ученик, как мне неоднократно говорили мои учителя, – это ничтожество... Я не видел для себя никакого будущего и не мог даже представить себя взрослым. Не потому, что я ничего не хотел, а потому, что считал себя ни на что не годным²⁹⁷.

Хотя Пеннак в конце концов преодолел этот пагубный настрой (правда, после попытки самоубийства), немногие дети проявляют такую психическую стойкость. В основном эффекты школьного стресса изучались на примере математики – школьного предмета, вызывающего тревогу у многих учеников. На уроках математики некоторые дети страдают самой настоящей математической депрессией. Они знают: что бы они ни делали, результат будет один – неудача. Математическая тревожность – известный, хорошо изученный и распространенный синдром. У детей, страдающих математической тревожностью, активируются нейронные сети боли и страха, в том числе миндалевидное тело, расположенное глубоко в мозге и задействованное в негативных эмоциях²⁹⁸. Такие ученики необязательно хуже остальных, но эмоциональное цунами, которое они переживают на уроках, «сметает» все на своем пути: вычислительные навыки, кратковременную память и особенно способность к обучению.

Многочисленные исследования, проведенные как на людях, так и на животных, подтверждают: стресс и тревога могут существенно снизить способность к обучению²⁹⁹. В гиппокампе мышей, например, условная реакция страха заметно ограничивает нейропластичность: после серии случайных, непредсказуемых ударов током нейронные связи животного оказываются в состоянии, характерном для конца сензитивного периода, когда синапсы, окруженные ригидными перинеурональными сетями, теряют способность изменять свою силу. И наоборот – не вызывающая страха стимулирующая среда способна вновь разблокировать синаптическую пластичность, высвобождая нейроны и возвращая их синаптическим контактам ювенильную подвижность.

Таким образом, представление плохих отметок в качестве наказания чревато высоким риском торможения прогресса у детей: стресс и разочарование будут неизбежно препятствовать обучению. В долгосрочной перспективе это может пагубно отразиться на их личности и самооценке. Американский психолог Кэрол Дуэк подробно изучила негативные последствия психической предрасположенности, которая состоит в приписывании собственных неудач (или успехов) некоему фиксированному и неизменяемому аспекту собственной личности. Дуэк назвала этот тип мышления «установкой на данность»: «Я плохо разбираюсь в математике», «Иностранные языки – не мой конек», и так далее. Эту точку зрения она противопоставляет фундаментально верной идее, что все дети способны к прогрессу, т.е. «установке на рост».

Исследования Дуэк подтверждают: при прочих равных условиях образ мыслей играет важную роль в обучении³⁰⁰^[34]. Искренняя вера в то, что любой человек способен к внутреннему росту, само по себе является источником этого роста. И наоборот, дети, которые убеждены, что навыки не поддаются совершенствованию и что каждый из них либо одарен, либо нет, показывают более низкие результаты. И правда, такой образ мыслей демотивирует: он не поощряет ни внимания, ни активного вовлечения, а ошибки интерпретирует как маркеры внутренней неполноценности. Однако, как мы уже видели, совершать ошибки естественно – во всяком случае, мы хотя бы попытались. Вспомните Теодора Рузвельта: «Никогда не ошибается тот, кто ничего не делает». Только представьте, что в одиннадцать лет Гротендик пришел бы к выводу, что математика – не его призвание, лишь потому, что число Пи на самом деле не равно трем, как он полагал.

Исследования показывают, что даже отличники могут страдать от установки на данность. Как и всем остальным, им необходимо много работать, чтобы поддерживать мотивацию, но мы не очень-то им помогаем, внушая, что «одаренным» все дается без труда.

Установка на рост вовсе не означает, что нужно говорить каждому ребенку, что он лучший, под предлогом повышения его самооценки. Скорее это означает, что нам следует акцентировать ежедневные успехи, поощрять его активное вовлечение, вознаграждать его усилия... и, в конце концов, растолковывать ему сами основы обучения: что все дети должны

прилагать усилия и не бояться отвечать, а главное – что совершать (и исправлять) ошибки – единственный действенный способ чему-то научиться.

Оставим последнее слово за Даниэлем Пеннаком: «Учителя существуют не для того, чтобы пугать своих учеников, а для того, чтобы помочь им преодолеть страх перед учебой. Стоит преодолеть этот страх, как жажда знаний становится ненасытной».

Испытывайте самих себя^[35]

Если отметки неэффективны, то как лучше всего интегрировать наши научные знания об обработке ошибок в школьные классы? Все просто. Во-первых, учащиеся необходимо побуждать к участию, к ответам, к активному генерированию гипотез, какими бы сомнительными они ни были; а во-вторых, быстро предоставлять объективную, некарательную обратную связь, которая позволит исправить ошибки.

Есть одна стратегия, которая удовлетворяет всем этим критериям, и все учителя о ней знают: она называется... проверка! Чего они не знают, так это того, что ее эффективность подтверждают десятки научных публикаций. Регулярная проверка знаний – так называемый метод активного воспроизведения – является одной из наиболее действенных педагогических стратегий³⁰¹. Регулярные проверки максимизируют долгосрочное научение. Сам акт проверки памяти делает ее прочнее. Это прямое отражение принципов активного вовлечения и обратной связи по ошибкам. Контрольные работы заставляют вас взглянуть правде в глаза, закрепить то, что вы знаете, и осознать то, чего вы не знаете.

Идею о том, что проверка (тестирование) есть краеугольный камень процесса научения, едва ли можно считать самоочевидной. Большинство учителей и учеников рассматривают контрольные работы и тесты как средство оценки знаний, полученных в других местах, на уроке или во время выполнения домашнего задания. Однако такого рода ранжирование или аттестация – наименее интересная часть проверочной работы. Важна не окончательная отметка, а усилия, которые вы прикладываете, чтобы извлечь информацию, и немедленная обратная связь, которую вы получаете. Как показывают исследования, в этом отношении тесты и контрольные часто играют не менее важную роль, чем сам урок.

К подобному выводу привела известная серия экспериментов американского психолога Генри Редигера и его сотрудников. В одном исследовании ученые просили студентов запомнить определенное количество слов за определенное количество времени, но разными способами. В первой группе было проведено восемь коротких учебных сеансов, во второй – шесть учебных сеансов и два теста в промежутке между ними, а в третьей – четыре учебных сеанса и четыре теста. Поскольку все три группы располагали одинаковым количеством времени, тестирование сокращало продолжительность периодов заучивания. Тем не менее результаты не оставляли сомнений: сорок восемь часов спустя студенты помнили список слов тем лучше, чем больше у них было возможностей себя проверить. Регулярно чередующиеся периоды заучивания и тестирования обеспечивали активную вовлеченность и эксплицитную обратную связь («Это слово я знаю, а вот это никак не могу запомнить...»). Такой самоанализ, или «метапамять», – ценная штука, благодаря которой ученик может сосредоточиться на трудных моментах во время последующих учебных сеансов³⁰². Эффект очевиден: чем больше вы себя проверяете, тем лучше запоминаете новый материал.

Рассмотрим еще один пример. Представьте, что вам нужно выучить несколько слов на иностранном языке. Допустим, одно из них – *qamutiik*, по-инуитски «санки». Один из вариантов – написать эти два слова на карточке с тем, чтобы между ними сформировалась мысленная ассоциация. Другой вариант – сначала прочитать слово инуитов, а затем, спустя пять секунд, перевод. Обратите внимание, что вторая тактика уменьшает объем доступной информации: в течение первых пяти секунд вы видите только слово *qamutiik*, без всяких напоминаний о том, что оно означает. Однако именно эта стратегия работает лучше всего³⁰³. Почему? Потому что она заставляет вас думать, пытаться вспомнить значение слова прежде, чем вы получите обратную связь. Опять же, активное вовлечение с последующей обратной связью максимизирует научение.

Парадокс в том, что ни ученики, ни учителя об этом не знают. Если вы спросите их, все скажут, что самопроверка – отвлекающий фактор и что главное – сам процесс заучивания. Вот почему учащиеся и преподаватели прогнозируют прямо противоположное тому, что наблюдается экспериментально: по их мнению, чем больше мы учимся, тем лучше результат.

В соответствии с этой – в корне ошибочной! – предпосылкой большинство старшеклассников и студентов тратят уйму времени на перечитывание конспектов и штудирование учебников, раскрашивая строки всеми цветами радуги. А ведь эти стратегии гораздо менее эффективны, чем маленький тест!

Откуда возникла эта иллюзия, что зубрежка перед экзаменом – лучшая тактика? Дело в том, что мы не различаем виды нашей памяти. В процессе чтения учебника или конспекта информация попадает в наше сознание. Некоторое время она находится в активной форме и хранится в сознательной рабочей памяти. Однако эта кратковременная память не имеет ничего общего с долговременной памятью, которая понадобится нам для того, чтобы воспроизвести ту же самую информацию несколько дней спустя. Уже через несколько секунд или минут содержимое рабочей памяти начинает улетучиваться и без регулярной самопроверки полностью исчезает через несколько суток. Таким образом, чтобы перенести информацию в долговременную память, необходимо сперва изучить материал, а затем обязательно себя проверить.

Реализовать эти идеи на практике не составит труда. Все, что вам нужно сделать, – это подготовить флэш-карточки: на одной стороне вы пишете вопрос, на другой – ответ. Чтобы проверить себя, тяните карточки одну за другой и для каждой старайтесь припомнить ответ (прогноз). После этого переверните карточку и сверьтесь с ответом (обратная связь). Если вы ответили неверно, вернитесь к той же информации в самое ближайшее время. Если вы ответили правильно, положите карточку в самый низ стопки: прямо сейчас повторять ее содержание не нужно, однако рано или поздно вы снова на нее наткнетесь – как раз тогда, когда начнется процесс забывания. В настоящее время существует множество телефонных и планшетных приложений, которые позволяют создавать собственную коллекцию флэш-карточек. Кроме того, аналогичный алгоритм лежит в основе многих обучающих программ, включая знаменитую *Duolingo* для изучения иностранных языков.

Метод интервального повторения

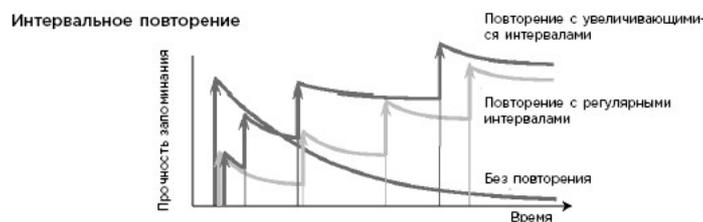
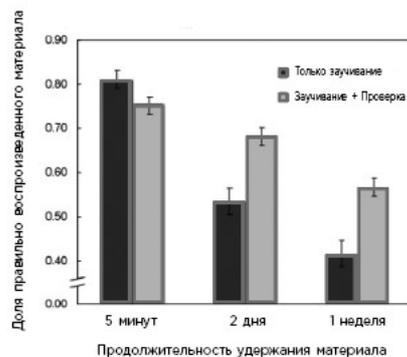
Почему чередование заучивания и проверки дает положительные результаты? Потому что в его основе лежит одна из самых эффективных стратегий, открытых педагогикой, – метод интервального повторения. Это золотое правило: процесс научения всегда лучше «растянуть» во времени, нежели пытаться освоить весь материал за один присест. Наилучший способ обеспечить длительное удержание материала – чередовать периоды заучивания с проверкой, причем интервалы между ними должны постепенно увеличиваться.

Десятилетия психологических исследований свидетельствуют: если вы хотите что-то выучить, но при этом ограничены во времени, отдельные уроки более эффективны, нежели сгруппированные в одно целое³⁰⁴. Растягивание процесса научения на несколько дней дает невероятный результат: как показывают эксперименты, повторение материала через регулярные промежутки времени позволяет улучшить память втрое по сравнению с попытками выучить все сразу. Правило простое, и все музыканты его знают: лучше играть по пятнадцать минут каждый день, чем два часа за один день в неделю.



Воспроизведение: 5,7 слова из 40

Воспроизведение: 6,4 слова из 40



Самопроверка – одна из лучших стратегий научения, заставляющая нас осознавать свои ошибки. При заучивании иностранных слов лучше стараться запомнить слово до получения обратной связи, чем просто зазубривать каждую пару (см. верхний рисунок). Эксперименты также показывают, что лучше чередовать периоды заучивания и проверки, чем тратить все время на заучивание (см. рисунок посередине). В долгосрочной перспективе материал запоминается намного лучше, когда периоды повторения разнесены во времени, особенно если временные интервалы постепенно увеличиваются (см. нижний рисунок).

Почему интервальная стратегия так эффективна? Нейровизуализационные исследования³⁰⁵ показывают, что попытки выучить весь материал за один раз ведут к снижению мозговой активности – возможно, потому, что повторяющаяся информация постепенно теряет свою новизну. Кроме того, повторение создает иллюзию знания: информация сохраняется в рабочей памяти, мы ее помним, а потому не видим смысла прикладывать дополнительные усилия. При интервальной схеме, напротив, мозговая активность усиливается – по всей видимости, интервалы создают эффект «желаемой трудности», препятствуя сохранению информации в рабочей памяти и заставляя соответствующие нейронные сети работать усерднее.

Каков же наиболее эффективный временной интервал между повторениями одного и того же материала? Выраженное улучшение наблюдается, когда интервал достигает двадцати четырех часов – вероятно, потому, что сон, как мы вскоре убедимся, играет центральную роль в консолидации приобретенных знаний. Впрочем, американский психолог Хэл Пашлер и его коллеги показали, что оптимальный интервал зависит от желаемой продолжительности удержания материала. Если вам нужно помнить информацию всего несколько дней или недель, следует повторять ее каждый день в течение недели. Если же знания должны сохраняться несколько месяцев или лет, интервал необходимо увеличить. Общее правило таково: в идеале интервал между повторениями должен составлять примерно 20% от желаемой продолжительности удержания материала. Например, если вам нужно помнить материал около десяти месяцев, повторите его через два месяца. Эффект огромный: однократного повторения информации через несколько недель достаточно, чтобы через

несколько месяцев вы могли вспомнить втрое больше! Чтобы сохранять информацию в памяти как можно дольше, постепенно увеличивайте временные интервалы: сначала повторяйте ее каждый день, затем каждую неделю, месяц, год... Эта стратегия гарантирует оптимальное воспроизведение в любой момент времени³⁰⁶.

На рисунке выше показано, почему так: каждое повторение способствует закреплению ранее выученного материала. Оно усиливает прочность ментальных репрезентаций и помогает нейтрализовать экспоненциальную забывчивость, которая характеризует нашу память. Предполагается, что разнесение учебных сеансов во времени позволяет мозгу выбрать из всех доступных сетей памяти ту, которой свойственна самая медленная кривая забывания, то есть ту, которая проецирует информацию дальше всего в будущее.

На самом деле, мы ошибались насчет памяти: это система, ориентированная не на прошлое, а на будущее. Задача памяти – отправить данные в будущее, чтобы мы могли получить к ним доступ позже. Повторяя одну и ту же информацию несколько раз с большими интервалами, мы убеждаем мозг, что эта информация достаточно ценна и обязательно понадобится нашему будущему «я».

Хэл Пашлер делает из этого исследования несколько практических выводов. Во-первых, материал всегда усваивается лучше, если его изучение и закрепление происходят в несколько приемов. Во-вторых, школьникам недостаточно повторить тему через несколько дней или недель. Если вы хотите запомнить информацию надолго, повторите ее через несколько месяцев. С этой точки зрения необходимо переосмыслить всю организацию учебников. Большинство из них разбито на главы, содержащие а) материал по определенной теме (что хорошо) и б) ориентированные на пройденную тему вопросы и задачи (что плохо). У такой структуры есть два существенных недостатка. Во-первых, она не предусматривает регулярное или интервальное повторение. А во-вторых, упражнения упрощены до предела: учащимся не нужно самим определять, какие знания или стратегии следует применить для выполнения того или иного задания. Эксперименты показывают: чтобы регулярно проверять свои знания, лучше смешивать самые разные виды задач, чем ограничиваться последними пройденными темами³⁰⁷.

А что насчет выпускных экзаменов или экзаменов в конце года? Наука о научении подсказывает, что это не самая лучшая затея: любые экзамены побуждают нас не столько к регулярным занятиям, сколько к зубрежке в последнюю минуту. Тем не менее экзамены – неплохой способ проверить приобретенные знания. Да и зубрежка не так бесполезна, как кажется: при условии что ученик усердно занимался все предыдущие месяцы, интенсивное повторение непосредственно перед экзаменом позволяет освежить знания и закрепить их в памяти. Еще лучше – повторять весь пройденный материал регулярно, из года в год. Итоговые контрольные работы на темы, освоенные за четверть или триместр, не гарантируют длительного удержания материала. Гораздо лучше работает комплексный обзор, который охватывает всю программу, пройденную с начала года.

Но какой смысл, спросите вы, повторять одно и то же с сентября по май? Зачем детям выполнять упражнения, которые они уже делали? Научатся ли они чему-нибудь, если получат высший балл? Конечно, научатся. Каким бы парадоксальным это ни казалось в главе, написанной во славу ошибок, польза обратной связи не ограничивается неверными ответами. Обратная связь помогает улучшить память даже тогда, когда ученик ответил правильно³⁰⁸. Почему? Потому что до тех пор, пока знание не будет полностью консолидировано, мозг продолжает учиться. Пока сохраняется неуверенность, сигналы ошибки продолжают распространяться в нашем мозге. Разница между первоначальным неуверенным ответом и последующей стопроцентно достоверной информацией действует как обратная связь: она сигнализирует о потенциальной ошибке, которую мы могли бы допустить и из которой, следовательно, можем извлечь урок.

Вот почему избыточное научение всегда идет только на пользу: пока мы не станем абсолютно уверены в своих знаниях, повторение и проверка будут улучшать наши результаты, особенно в долгосрочной перспективе. Более того, повторение играет и другую важную роль: оно позволяет автоматизировать умственные операции, сделать их бессознательными. Именно об этом последнем «краеугольном камне» научения – консолидации – мы и поговорим в следующей главе.

Глава 10

Консолидация

Представьте себе первоклассника, который успешно задействовал три базовых элемента научения и быстро обучился читать. Он активно занимался чтением, с любопытством и энтузиазмом. Он научился обращать внимание на каждую букву каждого слова, слева направо. Уже через несколько месяцев он мог без ошибок соотносить буквы со звуками и запоминать написание словарных слов. Однако он до сих пор читает медленно и с трудом. Чего же ему не хватает? Консолидации. Чтение, которое на этой стадии мобилизует все его внимание, должно стать автоматическим и бессознательным.

Анализ скорости считывания показывает: чем длиннее слово, тем больше времени требуется ребенку, чтобы его расшифровать (см. цветную иллюстрацию 18). Данная функция линейна: каждая дополнительная буква увеличивает время ответа примерно на одну пятую секунды. Это характерно для последовательных, пошаговых операций – и совершенно нормально: в таком возрасте чтение сводится к распознаванию букв или групп букв по очереди, что требует времени и внимания³⁰⁹. Тем не менее эта фаза не длится вечно: в последующие 36 месяцев скорость чтения заметно увеличится. Спустя два-три года интенсивной практики эффект длины слова полностью исчезнет. Дорогой читатель! В этот самый момент, когда ваш опытный мозг расшифровывает мои слова, вам требуется одинаковое количество времени, чтобы прочесть слово из трех или восьми букв. В среднем переход от последовательного к параллельному распознаванию слов занимает три года. В конце концов область мозга, отвечающая за зрительную форму слова, научится обрабатывать все буквы слова одновременно, а не последовательно.

Это отличный пример консолидации – перехода от медленной, сознательной и трудоемкой обработки информации к быстрым и бессознательным автоматизмам. Наш мозг никогда не перестает учиться. Даже когда навык освоен, мы продолжаем его оттачивать и совершенствовать, пока он не приобретает полностью автоматический характер. Механизмы автоматизации «компилируют» регулярно выполняемые операции в более эффективные процедуры и переносят их на другие нейронные сети, которые находятся за рамками нашего сознания, – туда, где процессы протекают независимо друг от друга, не мешая другим операциям.

Высвобождение ресурсов мозга

Если просканировать мозг ребенка, который только научился читать, что мы увидим? Помимо активации зрительных областей, отвечающих за распознавание букв, и участков височных долей, отвечающих за обработку фонем, слогов и слов, мы увидим возбуждение в теменных и префронтальных отделах коры³¹⁰. По мере консолидации навыка эта интенсивная и энергозатратная активность, отражающая усилия, внимание и сознательный контроль, постепенно исчезает (см. цветную иллюстрацию 18). У взрослого перечисленные области больше не участвуют в чтении и активируются только в особых случаях, когда мозг вынужден переключиться в медленный режим – например, если буквы р а з р е ж е н ы или 311.

Автоматизация навыка чтения предполагает создание ограниченной и узкоспециализированной нейронной сети для обработки последовательностей букв, с которыми мы сталкиваемся регулярно. По мере процесса научения в мозге возникает чрезвычайно эффективная система для распознавания наиболее распространенных символов, а также их комбинаций³¹². Наш мозг собирает статистику: он определяет, какие буквы встречаются чаще всего, где и в каких комбинациях. Даже первичная зрительная кора адаптируется к форме и положению наиболее частотных букв³¹³. Спустя несколько лет она переключается в нормальный режим и начинает функционировать без какого бы то ни было сознательного вмешательства³¹⁴. На этой стадии активация теменной и префронтальной коры уже не наблюдается: теперь мы можем читать без усилий.

Все вышесказанное относится не только к чтению, но и ко всем другим областям знаний. Учимся ли мы печатать на клавиатуре, играть на музыкальном инструменте или водить автомобиль, наши движения изначально находятся под контролем префронтальной коры: мы

выполняем их медленно и сознательно, одно за другим. К счастью, повторенье – мать ученья: со временем мы перестаем прикладывать усилия и можем пользоваться этими навыками, разговаривая или думая о чем-то другом. Благодаря постоянной практике функции контроля переходят к моторной коре – прежде всего к базальным ганглиям, скоплению подкорковых связей, регистрирующих наше автоматическое и повседневное поведение (включая молитвы и ругательства!). То же самое происходит и с арифметикой. Для маленького ребенка каждый пример – Эверест, восхождение на который требует величайших усилий и мобилизации нейронов префронтальной коры. На этом этапе вычисления осуществляются последовательно: чтобы решить пример $6 + 3$, большинство детей считают по одному: «Шесть... семь, восемь... девять!» По мере консолидации ребенок начинает извлекать ответ непосредственно из памяти; в это время активность префронтальной коры угасает в пользу специализированных сетей в теменной доле и вентральной части височной доли³¹⁵.

Почему автоматизация так важна? Потому что она высвобождает ресурсы мозга. Как вы помните, теменная и префронтальная кора представляют собой универсальную сеть управляющего контроля, которая не способна к мультизадачности. Пока центральный исполнительный орган нашего мозга сосредоточен на одной задаче, все остальные сознательные решения откладываются или отменяются. Таким образом, до тех пор пока некая умственная операция не автоматизирована за счет избыточного научения и, следовательно, требует усилий, она будет поглощать ценные ресурсы внимания и мешать нам сосредоточиться на чем-либо еще. Консолидация необходима, ибо позволяет направить наши драгоценные мозговые ресурсы на другие цели.

Рассмотрим конкретный пример. Представьте, что вам нужно решить математическую задачу, но ваши навыки чтения остались на начальном уровне: «Шо-фер вы-е-хал из го-ро-да А в два ча-са и в во-семь ча-сов о-ка-зал-ся в го-ро-де Б, ко-то-рый на-хо-дит-ся в пя-ти-ста ки-ло-мет-рах от го-ро-да А. Ка-ко-ва бы-ла е-го сре-д-ня-я с-ко-ро-с-ть?» Думаю, вы меня поняли: одновременно читать и считать практически невозможно. Трудности с чтением сводят на нет всякую способность к арифметическим размышлениям. Посему необходимо, чтобы наиболее полезные умственные инструменты, такие как чтение или арифметика, стали нашей второй натурой – иными словами, чтобы они работали без участия сознания и без усилий. Нельзя достичь высших уровней образовательной пирамиды, не укрепив предварительно ее фундамент.

Ключевая роль сна

В предыдущей главе мы убедились, что процесс научения протекает гораздо эффективнее, если учебная деятельность осуществляется с равными интервалами: проще говоря, вместо того чтобы пытаться усвоить весь урок за один день, лучше растянуть его во времени, разбив на несколько частей. Причина проста: каждую ночь наш мозг консолидирует то, что мы узнали днем. Это одно из важнейших открытий нейробиологии за последние тридцать лет: сон – не просто период бездействия или сбора мусора, который мозг накопил во время бодрствования. Совсем наоборот: пока мы спим, мозг остается активным; он запускает специальный алгоритм, который воспроизводит важные события прошедшего дня, и постепенно переносит их в более продуктивный отсек нашей памяти.

Открытие было сделано еще в начале XX века. В 1924 году два американских психолога, Джон Дженкинс (1901–1948) и Карл Далленбах (1887–1971), обратились к классическим исследованиям памяти³¹⁶. В частности, они подробно изучили работы одного из первых исследователей механизмов запоминания, немца Германа Эббингауза (1850–1909), который в конце XIX века открыл базовый психологический закон: чем больше проходит времени, тем хуже вы помните то, чему однажды научились. Предложенная Эббингаузом кривая забывания – красивая, монотонно убывающая экспонента. Однако Дженкинс и Далленбах обратили внимание на одну аномалию: кривая не показывала ухудшения памяти в период между восемью и четырнадцатью часами после усвоения нового материала. Почему? Оказывается, в эксперименте Эббингауза восьмичасовой лимит совпадал с тестами, проведенными в тот же день, а четырнадцатичасовой – с тестами, проведенными с интервалом в одну ночь. Чтобы разобраться в причинах столь странного явления, Дженкинс и Далленбах провели новое исследование, которое позволило разграничить две переменные: время до проверки памяти и влияние сна. В рамках эксперимента ученые просили студентов запомнить случайные слоги либо около полуночи, непосредственно перед сном, либо утром. Результаты не оставили

сомнений: то, что мы узнаем утром, со временем исчезает, согласно экспоненциальному закону Эббингауза; то, что мы узнаем в полночь, напротив, остается стабильным во времени (при условии, что студенты спали не менее двух часов). Другими словами, сон препятствует забыванию.

На ум приходит несколько альтернативных интерпретаций такой закономерности. Возможно, в течение дня память стирается потому, что во время бодрствования мозг накапливает токсичные вещества, которые выводятся во время сна; или, возможно, на память пагубно влияют другие события, случившиеся в промежутке между освоением нового материала и тестированием, чего во время сна, разумеется, не происходит. Тем не менее все эти альтернативные объяснения были окончательно отвергнуты в 1994 году: израильские исследователи продемонстрировали, что мы *продолжаем* учиться даже ночью – после ночного сна когнитивная и моторная деятельность улучшается без какой-либо дополнительной тренировки³¹⁷. Эксперимент был прост. В течение дня добровольцы учились обнаруживать полосу в определенной точке сетчатки. Эффективность выполнения задачи медленно увеличивалась, пока не достигала плато. Однако стоило ученым отправить испытуемых спать, как их ждал сюрприз: когда те просыпались на следующее утро, их производительность резко повышалась и оставалась на этом уровне на протяжении следующих нескольких дней. Сон явно вызывает дополнительное научение: если исследователи будили испытуемых каждый раз, когда наступала фаза быстрого сна, утром никаких улучшений не отмечалось.

Многочисленные исследования подтвердили и уточнили эти ранние открытия³¹⁸. Прежде всего оказалось, что положительный эффект ночного сна зависит от его качества. Чтобы оценить качество сна, ученые закрепляли на голове испытуемых несколько электродов и отслеживали медленные волны, характеризующие глубокий сон. Как выяснилось, и продолжительность, и глубина сна являются надежными предикторами повышения производительности после пробуждения. Данная взаимосвязь работает и в обратном направлении: потребность во сне, судя по всему, зависит от интенсивности стимуляции и научения в течение дня. У животных во время фазы быстрого сна в гиппокампе и коре возрастает экспрессия гена *zif-268*, отвечающего за нейропластичность (особенно она выражена у особей, ранее находившихся в обогащенной среде). Другими словами, повышенная стимуляция приводит к всплеску в ночной нейропластичности³¹⁹.

Хотя соответствующие роли разных фаз сна пока изучены не до конца, глубокий сон определенно способствует консолидации и обобщению знаний (то, что психологи называют семантической или декларативной памятью), в то время как быстрый сон, во время которого активность мозга близка к состоянию бодрствования, содействует закреплению перцептивных и моторных навыков (процедурная память).

Спящий мозг заново переживает прошедший день

Несмотря на то что психологические доказательства положительного влияния сна казались весьма убедительными, нейронный механизм, благодаря которому спящий мозг может учиться даже лучше, чем бодрствующий, оставался загадкой. В 1994 году нейрофизиологи Мэттью Уилсон и Брюс Макнотон совершили важное открытие: в отсутствие какой-либо внешней стимуляции нейроны гиппокампа самопроизвольно активируются во время сна³²⁰. При этом их активность носит отнюдь не случайный характер: ученые обнаружили, что она... воспроизводит перемещения животного в течение дня!

Как мы видели в главе 4, гиппокамп содержит нейроны места, то есть клетки, которые срабатывают, когда животное находится (или считает, что находится) в определенной точке пространства. В гиппокампе имеется множество нейронов, кодирующих место, при этом все они реагируют на разные локации. Записав активность достаточного их количества, вы обнаружите, что они охватывают все пространство, в котором движется животное. Когда крыса бежит по коридору, одни нейроны срабатывают у входа, другие – в середине, третьи – ближе к концу. Таким образом, путь, который проходит крыса, отражается в последовательном возбуждении цепочки клеток места: иначе говоря, движение в реальном пространстве превращается во временную последовательность в нейрональном пространстве.

Но вернемся к экспериментам Уилсона и Макнотона. Они обнаружили, что, когда крыса засыпает, клетки места в ее гиппокампе снова возбуждаются в том же самом порядке. Нейроны буквально воспроизводят траекторию, по которой двигалось животное во время бодрствования. Разница лишь в скорости: во время сна клетки могут срабатывать в двадцать раз быстрее. Когда крыса спит, ей снятся настоящие гонки!

Связь между возбуждением нейронов гиппокампа и местоположением животного настолько прочна, что нейробиологи могут расшифровать содержание сна по паттернам нейронной активности³²¹. Во время бодрствования, когда животное бродит по реальному миру, соответствующая аппаратура систематически фиксирует его местоположение и мозговую активность. Эти данные позволяют обучить специальный декодер – компьютерную программу, которая меняет эту зависимость на противоположную и угадывает положение животного по паттерну возбуждения нейронов. Если ввести в декодер данные, полученные во время сна, мы увидим, что, пока животное дремлет, его мозг вычерчивает виртуальные траектории в пространстве.

Таким образом, мозг крысы на высокой скорости воспроизводит те паттерны активности, которые он пережил накануне. Каждая ночь оживляет в памяти минувший день. Что примечательно, реактивация нейронов не ограничивается гиппокампом, а распространяется на кору, где играет решающую роль в синаптической пластичности и консолидации памяти. Благодаря ночной реактивации любое событие нашей жизни, зафиксированное в эпизодической памяти всего один раз, может быть воспроизведено сотни раз в течение ночи (см. цветную иллюстрацию 19). Не исключено, что в подобном переносе воспоминаний и состоит основная функция сна³²². Возможно, гиппокамп специализируется на хранении событий прошедшего дня, используя правило быстрого научения с одной попытки. Ночная реактивация нейронных сигналов распространяет их на другие нейронные сети, главным образом расположенные в коре и способные извлекать максимум информации из каждого эпизода. Возьмем крысу, которая учится выполнять новую задачу: чем выше активность коркового нейрона ночью, тем больше его участие в выполнении задачи на следующий день³²³. Вывод: реактивация клеток гиппокампа ведет к корковой автоматизации.

Наблюдается ли такое же явление у людей? Да. Нейровизуализационные исследования показывают, что во время сна нейронные сети, которые мы использовали в течение дня, реактивируются³²⁴. После нескольких часов игры в *Tetris* спящие геймеры буквально галлюцинировали каскад геометрических фигур, а их глаза совершали соответствующие движения сверху вниз. В недавнем исследовании испытуемых укладывали спать в аппарат МРТ, но будили всякий раз, как только их электроэнцефалограмма показывала, что они видят сон. Непосредственно перед пробуждением аппаратура фиксировала самопроизвольную активацию многих участков их мозга. Записанная активность прогнозировала содержание сновидений. Если испытуемый сообщал, например, что видел во сне людей, ученые обнаруживали активность в области, связанной с распознаванием лиц. Другие эксперименты показали, что интенсивность этой реактивации – мощный предиктор не только содержания сновидения, но и степени консолидации памяти после пробуждения. Некоторые нейрохирурги зарегистрировали активность отдельных нейронов и обнаружили, что, как и у крыс, паттерны импульсов у человека копируют последовательность событий, пережитых в предыдущий день.

Сон и научение тесно связаны. Многочисленные эксперименты показывают, что спонтанные вариации в глубине сна коррелируют с вариациями в производительности на следующий день. Например, если днем мы учились пользоваться джойстиком, то ночью частота и интенсивность медленных волн увеличится в теменных областях мозга, задействованных в таком сенсомоторном научении. Чем эти волны интенсивнее, тем лучше результат на следующий день³²⁵. Аналогичным образом после моторного научения наблюдается всплеск активности в моторной коре, гиппокампе и мозжечке, сопровождающийся снижением активности в некоторых лобных, теменных и височных отделах³²⁶. Все подобные эксперименты дают одинаковые результаты: после сна активность мозга меняется; часть знаний, полученных в течение дня, закрепляется и передается в ведение более автоматических и специализированных нейронных сетей.

Хотя автоматизация и сон тесно связаны, каждый ученый знает, что корреляция – это не причинность. Является ли эта связь причинной? Чтобы это проверить, мы можем искусственно увеличить глубину сна, создав резонансный эффект. Во время сна в мозге

спонтанно возникают медленные волны с частотой порядка сорока-пятидесяти колебаний в минуту. Дав мозгу дополнительный толчок на нужной частоте, мы можем заставить эти ритмы резонировать и тем самым увеличить их интенсивность – примерно так мы раскачиваем качели, пока их колебания не приобретут желаемую амплитуду. Немецкий исследователь Ян Борн проделывал это двумя способами: либо пропускал через череп крошечные токи, либо просто воспроизводил звук, синхронизированный с мозговыми волнами спящего. И под воздействием токов, и под воздействием звуковых волн мозг спящего человека генерировал значительно более медленные волны, характерные для глубокого сна. В обоих случаях резонанс приводил к более прочной консолидации памяти, сформированной в процессе научения³²⁷.

Этим эффектом недавно воспользовался один французский стартап: он продает повязки на голову, которые якобы облегчают засыпание и увеличивают глубину сна, проигрывая тихие звуки, стимулирующие медленные ритмы. Другие исследователи пытаются повысить эффективность научения, заставляя спящий мозг реактивировать определенные воспоминания. Представьте, что вы сидите на уроке в классе, в котором сильно пахнет розами. Как только вы погружаетесь в глубокий сон, мы опрыскиваем вашу спальню тем же ароматом. Эксперименты показывают: на следующее утро вы гораздо лучше будете помнить информацию, усвоенную накануне, если в вашей спальне будет пахнуть розами, а не чем-то другим³²⁸. Аромат роз служит бессознательным сигналом, побуждающим ваш мозг реактивировать данный конкретный эпизод, тем самым содействуя его консолидации в памяти.

Аналогичного эффекта можно добиться и со слуховыми сигналами. Представьте, что вас просят запомнить локации пятидесяти объектов, каждый из которых ассоциируется с определенным звуком (кошка мяукает, корова мычит и т.д.). Пятьдесят штук – это много... но у нас есть ночь! В ходе одного из экспериментов исследователи стимулировали мозг спящих испытуемых половиной этих звуков. Неосознанное прослушивание звуков во время глубокого сна способствовало нейронной реактивации, а потому на следующее утро испытуемые могли припомнить расположение соответствующих объектов гораздо лучше³²⁹.

Получается, в будущем «махинации» со сном помогут нам учиться быстрее и эффективнее? Многие студенты пользуются этим трюком уже сегодня: просматривая важный материал непосредственно перед тем, как заснуть, они неосознанно пытаются стимулировать ночную реактивацию. Но давайте не будем путать такие полезные стратегии с идеей, будто во время сна можно овладеть совершенно новыми навыками. Это миф. Некоторые шарлатаны продают аудиозаписи, которые якобы научат вас иностранному языку, пока вы спите. Но с исследованиями не поспоришь: такие «курсы» не дают ровным счетом никакого эффекта³³⁰. За некоторыми исключениями данные говорят о том, что спящий мозг не усваивает новую информацию: он может воспроизводить только то, что уже пережил. Чтобы овладеть таким сложным навыком, как иностранный язык, необходимы две вещи: активная практика днем и сон ночью для реактивации и консолидации усвоенного. Это единственное, что работает.

Открытия во сне

Значит, сон только укрепляет память? Многие ученые думают иначе: они утверждают, что ночью совершают открытия. Самый известный случай – немецкий химик Август Кекуле фон Штрадониц (1829–1896), которому приснилась структура бензола – необычной молекулы, чьи шесть атомов углерода образуют замкнутую цепь, похожую на кольцо или... змею, которая кусает себя за хвост. Вот как Кекуле описывает свой сон в ту судьбоносную ночь:

И снова атомы запрыгали у меня перед глазами... Мой мысленный взор, обостренный повторяющимися видениями такого рода, теперь мог различить более крупные структуры разной формы; длинные ряды, часто тесно сплетенные, изгибались и извивались, подобно змеям. Но смотрите! Что это было? Одна из змей ухватила себя за хвост и насмешливо закужилась перед моими глазами.

Кекуле заключает: «Давайте учиться спать, и тогда, возможно, мы узнаем правду».

Может ли сон действительно повысить креативность и привести нас к истине? Хотя специалисты по истории науки расходятся во мнениях относительно подлинности

кекулевского сна с Уроборосом, идея ночной инкубации широко распространена среди ученых и художников. В недавнем интервью дизайнер Филипп Старк с юмором заметил: «Каждый вечер, закрывая книгу... я говорю жене: “Я иду на работу”»³³¹. Я и сам частенько находил решение трудной проблемы после пробуждения. Однако жизненные наблюдения – это не доказательства. Необходим эксперимент. Именно такой эксперимент и провела команда ученых во главе с Яном Борном³³². Днем исследователи обучали испытуемых сложному алгоритму, включавшему серию арифметических операций с заданным числом. На самом деле, задачу можно было упростить и вычислить ответ гораздо быстрее. Если до сна лишь немногие испытуемые догадывались о существовании легкого способа, то наутро их число удваивалось. Если же испытуемые не имели возможности поспать, момент озарения не наступал никогда. Примечательно, что результаты не зависели от времени тестирования (утро, день или вечер). Следовательно, заключили ученые, в данном случае временной фактор не являлся определяющим: инсайт был обусловлен только сном.

Получается, ночная консолидация не ограничивается закреплением существующих знаний. Открытия дня не только прочно фиксируются в памяти, но и перекодируются в более абстрактную и общую форму. Решающую роль в этом процессе, несомненно, играет ночная реактивация нейронов. Каждую ночь идеи, которые возникли у нас в течение дня, «проигрываются» сотни раз в ускоренном темпе, тем самым увеличивая шансы на то, что в итоге кора обнаружит некое общее правило. Кроме того, двадцатикратное ускорение нейронных разрядов сжимает информацию. Воспроизведение на высокой скорости подразумевает, что нейроны, которые срабатывали с большими интервалами во время бодрствования, ночью возбуждаются один за другим. Данный механизм кажется идеальным для сбора, синтеза, сжатия и «преобразования сырой информации в полезное и пригодное для использования знание» – почти дословное определение интеллекта, предложенное одним из ведущих исследователей искусственного интеллекта Демисом Хассабисом.

Будут ли разумные машины будущего спать так же, как мы? Вопрос странный, и все-таки я думаю, что в определенном смысле будут: их алгоритмы обучения, вероятно, будут включать фазу консолидации, подобную тому, что мы называем сном. На самом деле, специалисты уже разработали несколько алгоритмов, имитирующих цикл «сон—бодрствование»³³³. Эти алгоритмы – отличные модели для тестирования нового подхода к научению, который я отстаиваю в этой книге. Согласно новым представлениям, научение состоит в построении внутренней генеративной модели внешнего мира. Помните, что наш мозг содержит масштабные внутренние модели, способные к синтезу самых разных мысленных образов, реалистичных диалогов и значимых выводов. В состоянии бодрствования мы приспособливаем эти модели к окружающей среде: мы анализируем сенсорные данные, которые получаем из внешнего мира, и на их основе выбираем ту модель, которая лучше всего описывает мир вокруг нас. На этой стадии научение – главным образом восходящая операция: неожиданные сенсорные сигналы, сталкиваясь с прогнозами внутренних моделей, генерируют сигналы ошибки, которые поднимаются вверх по корковой иерархии и корректируют статистические веса на каждом шаге, в результате чего точность нисходящих моделей значительно возрастает.

Новая идея состоит в том, что во время сна наш мозг работает не «снизу вверх», а «сверху вниз». Ночью мы используем генеративные модели для синтеза новых, непредвиденных образов. Этот дополнительный массив данных, которые были созданы из ничего и на котором тренируется часть нашего мозга, позволяет скорректировать восходящие связи. Поскольку известны как параметры генеративной модели, так и ее сенсорные следствия, обнаружить связь между ними становится легче. Итог: наша эффективность в извлечении абстрактной информации, лежащей в основе конкретного сенсорного сигнала, возрастает. После крепкого ночного сна достаточно малейшей подсказки, чтобы определить лучшую ментальную модель реальности, какой бы абстрактной она ни была.

Согласно этим представлениям, сновидения есть не что иное, как расширенный тренировочный набор образов: чтобы приумножить свой неизбежно ограниченный дневной опыт, мозг прибегает к внутренним реконструкциям реальности. По всей видимости, сон позволяет решить проблему, с которой сталкиваются все алгоритмы машинного обучения: недостаток данных для тренировки. Чтобы учиться, современные искусственные нейросети нуждаются в огромных массивах данных, но жизнь слишком коротка, а потому наш мозг вынужден довольствоваться той информацией, которую он успевает собрать в течение дня.

Возможно, сон – идеальный выход из положения: пока мы спим, мозг в ускоренном режиме моделирует множество событий, пережить которые в реальности не хватит и целой жизни.

Во время этих мысленных экспериментов мы иногда совершаем открытия. В этом нет ничего волшебного: работая, наша внутренняя моделирующая машина время от времени наталкивается на неожиданные результаты – как шахматист, который, освоив правила, может потратить годы на изучение их следствий. На самом деле, некоторыми величайшими научными открытиями человечество обязано именно мысленным образам: Эйнштейну, например, приснился фотон, а Ньютон представлял Луну, падающую на Землю, подобно яблоку. Даже самый знаменитый эксперимент Галилея, в котором он сбрасывал предметы с Пизанской башни и доказывал, что скорость свободного падения не зависит от массы, вероятно, никогда не происходил в реальности. Достаточно было провести мысленный эксперимент: Галилей вообразил, что бросает две сферы, одну легкую и одну тяжелую, с вершины башни; затем он предположил, что тяжелая будет падать быстрее, и с помощью ментальных моделей показал, что это ведет к противоречию. Допустим, говорил он, что я соединю эти две сферы проволокой ничтожной массы. Получившаяся в результате система образует более тяжелый объект и, следовательно, должна падать еще быстрее. Но это абсурд, ибо более легкая сфера, которая падает не так быстро, должна замедлить более тяжелую. Эти бесконечные противоречия ведут к одному-единственному выводу: все предметы падают с одинаковой скоростью независимо от их массы.

Именно такого рода рассуждения обеспечивает наш ментальный симулятор, днем и ночью. Сам факт того, что мы можем вызывать в воображении столь сложные ментальные картины, свидетельствует о наличии в нашем мозге великого множества алгоритмов. Конечно, мы учимся днем, но ночная реактивация нейронов приумножает наш потенциал. Возможно, в этом и кроется один из секретов нашего вида: предварительные данные показывают, что человеческий сон глубже и эффективнее, чем у всех остальных приматов³³⁴.

Сон, детство и школа

А как же дети? Всем известно, что младенцы проводят большую часть времени во сне и что с возрастом сон укорачивается. Это логично: раннее детство – особый период, в течение которого наши алгоритмы научения испытывают большую нагрузку. И действительно, экспериментальные данные показывают, что сон ребенка в два-три раза эффективнее, чем взрослого. После интенсивного обучения десятилетние дети погружаются в глубокий сон гораздо быстрее, чем взрослые, а их медленные волны более выражены. Результат: ребенок, которому накануне показали некую последовательность, на следующее утро проснется свежим и отдохнувшим и обнаружит в ней больше закономерностей, чем взрослый³³⁵.

Ночная консолидация работает уже в первые месяцы жизни. Младенцы в возрасте до одного года полагаются на нее, когда, например, учат новые слова. Так, после непродолжительного сна (час-полтора) малыши гораздо лучше помнят слова, которые выучили за несколько часов до засыпания³³⁶. Но главное – сон повышает способность к обобщению. Когда младенцы впервые слышат слово «лошадь», они ассоциируют его только с одним или двумя конкретными животными, а после сна – с другими особями, которых они никогда раньше не видели. Подобно Кекуле в колыбели, эти начинающие ученые делают открытия во сне и просыпаются с гораздо лучшей теорией слова «лошадь».

А что насчет детей школьного возраста? Результаты исследований не вызывают сомнений: в подготовительном классе даже короткий дневной сон содействует более прочному запоминанию материала, который дети усвоили утром³³⁷. Для максимального эффекта сон должен наступить в течение нескольких часов после обучения. Впрочем, положительное влияние сна наблюдается только у тех детей, которые спят днем регулярно. Поскольку мозг естественным образом регулирует потребность во сне в зависимости от интенсивности дневной стимуляции, заставлять всех детей спать после обеда нецелесообразно. И наоборот, следует поощрять дневной сон у тех, кому он действительно необходим.

К сожалению, из-за телевидения, смартфонов и интернета детский сон, как и сон взрослых, оказался под угрозой, причем по всем фронтам. Каковы последствия? Может ли хронический недосып вызвать нарушения обучаемости, распространенность которых растет с каждым годом? Пока это только гипотеза, однако предварительные данные наводят на

размышления³³⁸. Например, многие гиперактивные дети с нарушениями внимания могут просто страдать от хронического недосыпания. Некоторым свойственно ночное апноэ, которое препятствует глубокому сну; в этом случае очищения дыхательных путей будет недостаточно, чтобы устранить не только хронический недостаток сна, но и проблемы с вниманием. Более того, результаты последних экспериментов показывают, что электрическая стимуляция мозга может существенно смягчить дефицит научения у гиперактивных детей за счет увеличения глубины волн в фазе медленного сна.

Позвольте мне внести ясность: эти новейшие данные предварительны и нуждаются в перепроверке. Кроме того, я никоим образом не отрицаю существование подлинных нарушений внимания (например, у детей, которым помогает специальная тренировка внимания, а иногда и препарат риталин). Однако с точки зрения педагогики нет никаких сомнений в том, что более длительный и качественный сон пойдет на пользу всем детям – особенно тем, кто испытывает трудности с обучением.

Эта идея была проверена на подростках. В период полового созревания хронобиология показывает, что цикл сна меняется: подростки не чувствуют потребности рано ложиться спать, зато по утрам просыпаются с большим трудом. Нечто подобное, вероятно, пережили все мы. Дело не в нежелании вставать; скорее это следствие хаоса в нейронных и гормональных сетях, контролирующих цикл «сон—бодрствование». К сожалению, никто почему-то не сообщил об этом директорам школ, которые продолжают настаивать, чтобы ученики являлись на занятия с утра пораньше. Что плохого в том, чтобы изменить эту традицию? Проведенный эксперимент дал многообещающие результаты: если перенести начало уроков всего на час-полтора, подростки спят дольше. Итог – существенно улучшается посещаемость, внимание и, следовательно, успеваемость³³⁹. Список положительных эффектов можно продолжать: в частности, Американская академия педиатрии настоятельно рекомендует школам начинать занятия позже в качестве эффективной контрмеры против подросткового ожирения, депрессии и несчастных случаев (например, вождения в состоянии сонливости). Тот факт, что общее физическое и психическое благополучие детей можно улучшить так легко (и практически бесплатно), – великолепный пример модификации системы образования с учетом особенностей биологии мозга.

Заключение

Нейробиология в образовании

С наибольшими и наиважнейшими трудностями человеческое познание встречается именно в том разделе науки, который толкует о воспитании и обучении в детском возрасте.

Мишель Монтень, «Опыты» (1580)^[36].

Педагогика подобна медицине: это искусство, но такое искусство, которое основано – или должно быть основано – на точном научном знании.

Жан Пиаже, «Современная педагогика» (1949)

Надеюсь, я убедил вас, что благодаря последним достижениям в сферах когнитивной психологии, нейробиологии, искусственного интеллекта и педагогики сегодня мы точно знаем, как учится наш мозг. Эти знания отнюдь не очевидны, а потому от большинства прежних представлений о научении придется отказаться.

- Нет, младенцы – это не «чистые листы»: уже на первом году жизни они обладают обширными знаниями о физических объектах, числах, вероятностях, пространстве и людях.

- Нет, мозг ребенка – это не губка, которая послушно впитывает структуру окружающей ее среды. Вспомните Фелипе, слепого и парализованного бразильского мальчика, который сочинял чудесные истории, или Николаса Сондерсона, слепого математика, который занимал ту же должность, что и Ньютон: такие случаи подсказывают нам, что ни искажения, ни даже полное отсутствие сенсорных сигналов не влияют на способность ребенка к восприятию абстрактных идей.

- Нет, мозг – это не просто сеть податливых нейронов, которые формируются под влиянием входных данных: все крупные пучки волокон присутствуют уже при рождении, а нейропластичность, как бы она ни была необходима, обычно корректирует лишь последние миллиметры наших нервных связей.

- Нет, научение не происходит пассивно под действием данных или лекций: напротив, когнитивная психология и нейровизуализационные исследования говорят нам, что дети – это настоящие ученые, постоянно генерирующие новые гипотезы, а мозг – это вечно активный орган, который учится путем проверки моделей, проецируемых на внешний мир.

- Нет, ошибки совершают не только «плохие» ученики: ошибки – это неотъемлемая часть научения, ибо наш мозг может скорректировать свои модели только тогда, когда обнаруживает несоответствие между собственными представлениями и реальностью.

- Нет, сон – это не просто отдых: это неотъемлемая часть нашего алгоритма научения, важный период, в течение которого наш мозг воспроизводит свои модели по кругу и усиливает опыт дня в десять, а то и сто раз.

- И нет, современные самообучающиеся машины не превосходят человеческий мозг: этот орган был и остается – по крайней мере, на сегодняшний день – самым быстрым, самым действенным и самым энергоэффективным из всех устройств обработки информации. Наш мозг – самая настоящая вероятностная машина; в течение дня он успешно извлекает максимум информации из каждой прожитой секунды, а ночью преобразует ее в абстрактное и общее знание. К сожалению, способ, которым он это делает, воспроизвести в компьютерах пока не удастся.

В прометеевской битве между процессором и нейроном, машиной и мозгом по-прежнему выигрывает последний. В принципе в механике мозга нет ничего такого, чего не смогла бы симитировать машина. Все идеи, которые я изложил здесь, давно известны специалистам в области вычислительной техники, в своих исследованиях черпающим вдохновение из нейробиологии³⁴⁰. И все же на практике машинам еще предстоит пройти

долгий путь. Чтобы подняться на новый уровень, им понадобится многое из того, о чем мы говорили в этой книге: внутренний язык мышления, который позволяет легко рекомбинировать понятия; алгоритмы рассуждений на базе распределения вероятностей; функция любопытства; эффективные системы управления вниманием и памятью; возможно, алгоритм сна/бодрствования, расширяющий обучающее множество и увеличивающий шансы на открытие. Алгоритмы такого типа уже существуют, но их производительность несравнимо ниже таковой у новорожденного ребенка. Одним словом, мозг сохраняет преимущество над машинами, и я убежден, что так будет еще долгое время.

Тринадцать напутствий, которые позволят развить детский потенциал

Чем дольше я изучаю человеческий мозг, тем больше поражаюсь его возможностям. Однако я также знаю, что его производительность сильно зависит от среды, в которой он развивается. Многим детям не удается реализовать свой потенциал по одной простой причине: их семьи и школы не обеспечивают идеальных условий для научения.

Международные сравнения вызывают тревогу: они показывают, что за последние пятнадцать или двадцать лет школьное образование во многих западных странах, включая мою родину, Францию, резко ухудшилось, тогда как в азиатских странах и городах – Сингапуре, Шанхае, Гонконге и других – наоборот, улучшилось³⁴¹. Особенно это заметно на примере математики, которая раньше была одной из самых сильных сторон французской системы школьного образования. В период с 2003 по 2015 год показатели так сильно упали, что, по данным *TIMSS*, моя страна сейчас занимает последнее место в Европе^[37] (*TIMSS, Trends in Mathematics and Science Study* – международное мониторинговое исследование качества школьного математического и естественно-научного образования, позволяющее сравнить подготовку 15-летних детей в разных странах мира).

Сталкиваясь с неудовлетворительными результатами, мы зачастую спешим обвинить во всем учителей. На самом деле, никто не знает истинных причин этой печальной тенденции. Кто же виноват: родители, школы или общество в целом? А может, все дело в недостатке сна, невнимательности или видеоиграх? Каковы бы ни были причины, я убежден, что новейшие достижения науки о научении помогут исправить ситуацию. Сегодня мы знаем гораздо больше об условиях, которые содействуют научению и улучшают память. Все мы, родители и учителя, должны научиться применять эти знания в повседневной жизни, дома и в классе.

Все результаты научных исследований, изложенные в этой книге, сводятся к нескольким простым советам, легко применимым на практике. Давайте повторим их вместе.

- **Адекватно оценивайте своих детей.** При рождении младенцы обладают широчайшим диапазоном ключевых навыков и знаний. Представления о физических объектах, чувство числа, способность к языкам, знания о людях и их намерениях... В мозге маленьких детей уже имеется столько модулей! Все эти основополагающие навыки позже пригодятся для изучения физики, математики, языков и философии. Если мы хотим извлечь максимальную пользу из интуитивных детских представлений, необходимо, чтобы все слова и символы, которыми овладевают дети, даже самые абстрактные, были связаны с уже существующим знанием. Именно эта связь и придает им смысл.

- **Старайтесь извлекать максимальную выгоду из сензитивных периодов в развитии мозга.** В первые годы жизни каждый день создаются и разрушаются миллиарды синапсов. Эта бурная деятельность делает мозг ребенка крайне восприимчивым, особенно к овладению речью. Следовательно, обучение второму языку должно начинаться как можно раньше. Также имейте в виду, что нейропластичность сохраняется по меньшей мере до подросткового возраста. В течение всего этого периода изучение любого иностранного языка наиболее эффективно, ибо ведет к фактической трансформации мозга.

- **Обогащайте окружающую среду.** В том, что касается научения, мозг ребенка – самый мощный из суперкомпьютеров. Помните об этом и снабжайте его нужными данными с самого раннего возраста. Это могут быть словесные игры, конструкторы, сказки или головоломки... Ведите с ребенком серьезные беседы, без колебаний отвечайте на вопросы (даже самые сложные), используя «недетский» лексикон, рассказывайте о том, как устроен мир. Помните, что, обогащая среду малыша, особенно в плане языков, вы содействуете развитию его мозга и продлеваете период пластичности.

- **Перестаньте думать, что все дети разные.** Идея, будто каждому из нас свойственен свой собственный, индивидуальный стиль научения, – миф. Нейровизуализационные исследования показывают, что все мы полагаемся на одни и те же нейронные сети и правила научения. Нейронные сети для чтения и математики одинаковы у всех, плюс-минус несколько миллиметров – даже у слепых детей. В научении все мы сталкиваемся с одинаковыми препятствиями и преодолеваем их одними и теми же способами. Индивидуальные различия, если они существуют, больше касаются имеющих у детей знаний, мотивации и скорости, с

которой они учатся. Точно определяйте текущий уровень каждого ребенка – это позволит выявить наиболее актуальные проблемы. Но главное – учителя и родители должны убедиться, что все дети овладели основами языка, грамоты и математики, которые нужны каждому.

- **Обращайте внимание на внимание.** Внимание – это ключ к научению: запоминается только та информация, которая была предварительно амплифицирована вниманием и сознанием. Учителя должны уметь привлекать внимание своих учеников и направлять его на самое важное. Это подразумевает тщательное избавление от любых отвлекающих факторов: обильно иллюстрированные учебники и чрезмерно украшенные классы только отвлекают детей от их основной задачи и мешают им сосредоточиться.

- **Поддерживайте активность, любознательность, вовлеченность и автономию детей.** Пассивные ученики мало чему научатся. Стимулируйте их активность. Задействуйте их интеллект так, чтобы их ум искрился любопытством и постоянно генерировал новые гипотезы. Но не ждите, что они обо всем узнают сами: придерживайтесь структурированной учебной программы.

- **Делайте так, чтобы каждый школьный день приносил радость.** Система вознаграждения – важный модулятор нейропластичности. Чтобы ее активировать, вознаграждайте всякое усилие, а каждый урок превращайте в занимательное приключение. Все дети чувствительны к материальным наградам, однако их социальный мозг точно так же реагирует на улыбку и поощрение. Похвала и осознание собственного прогресса – награды сами по себе. Кроме того, избегайте источников беспокойства и стресса, которые мешают научению, – особенно в математике.

- **Поощряйте усилия.** Приятный учебный опыт не есть синоним «не требующий усилий». Напротив, самые интересные вещи – чтение, математика или игра на музыкальном инструменте – требуют многолетней практики. Убеждение, будто все это дается без труда, может сыграть с нами злую шутку. Некоторые дети неизбежно придут к выводу, что, раз у них ничего не получается, они тупицы. Объясните им, что все ученики должны стараться изо всех сил – вот главный залог успеха. Делайте установку на рост, а не на данность.

- **Поощряйте мышление на более глубинном уровне.** Чем глубже наш мозг обрабатывает информацию, тем лучше мы ее запоминаем. Никогда не довольствуйтесь поверхностным научением; всегда стремитесь к более глубокому пониманию. Не забывайте слова Генри Редигера: «Усложнение условий научения, требующее от учащихся больших когнитивных усилий, часто приводит к лучшему удержанию материала».

- **Ставьте четкие цели.** Дети учатся лучше, когда цель обучения сформулирована четко и ясно. Учащиеся должны знать: все, что они делают в данный конкретный момент, ведет к этой цели. Объясните, чего вы от них ждете, и сосредоточьтесь на поставленной задаче.

- **Признавайте и исправляйте ошибки.** Чтобы обновлять ментальные модели, наши мозговые центры должны обмениваться сообщениями об ошибках. Следовательно, ошибка – неотъемлемое условие научения. Не наказывайте за ошибки, а быстро исправляйте их, предоставляя детям подробную, но не вызывающую стресса обратную связь. Согласно фонду *Education Endowment Foundation*, качество обратной связи, которую предоставляют учителя своим ученикам, является наиболее эффективным двигателем академического прогресса.

- **Регулярно тренируйтесь.** Однократного заучивания недостаточно – детям необходимо консолидировать то, чему они научились. Только так новый навык может приобрести автоматический, бессознательный и рефлексивный характер. Подобная рутинизация разгружает префронтальные и теменные сети нейронов. Наиболее эффективная стратегия состоит в «растягивании» процесса научения: по чуть-чуть каждый день. Это позволяет информации навсегда отпечататься в памяти.

- **Обеспечьте ученикам достаточное количество сна.** Сон – важнейшая составляющая нашего алгоритма научения. Ночной и даже дневной сон идет мозгу только на пользу. Посему убедитесь, что ваши дети спят долго и крепко. Извлечь максимальную выгоду из бессознательной работы мозга во время ночного сна позволяет один простой прием – повторение учебного материала непосредственно перед засыпанием. А поскольку цикл сна у подростков сдвинут, не будите их слишком рано!

Только лучше узнав самих себя, мы сможем максимально задействовать мощные алгоритмы, которыми снабжен наш мозг. Все дети должны знать четыре столпа научения:

внимание, активное вовлечение, обратная связь по ошибкам и консолидация. Вкратце их можно сформулировать так: «сосредоточьтесь», «активно работайте на уроке», «учитесь на своих ошибках» и «тренируйтесь каждый день, извлекайте пользу из каждой ночи». Это очень простые правила, к которым нам всем следует прислушаться.

Школы будущего

Как же привести существующую школьную систему в гармонию с открытиями когнитивной науки и науки о мозге? Необходим новый альянс. Подобно тому как медицина опирается на целую пирамиду биологических и фармакологических изысканий, образование должно полагаться на эмпирические исследования, включая фундаментальные лабораторные эксперименты и исследования на уровне класса. Уверен, в будущем именно так и будет. Только объединив силы учителей, родителей и ученых, мы сумеем возродить любопытство и любовь к учению у всех детей, что поможет максимально реализовать их познавательный потенциал.

На учителей возложена важнейшая задача – обучать детей, в руках которых находится будущее нашего мира. Тем не менее педагоги зачастую располагают минимальными ресурсами для достижения этой цели. Они определенно заслуживают гораздо большего уважения и инвестиций. Сегодня преподаватели регулярно сталкиваются с серьезными проблемами, включая ограниченность средств, переполненные классы, рост насилия и безжалостную тиранию учебного плана. Удивительно, но большинство учителей не получают никакой профессиональной подготовки в области науки о научении. По моему искреннему убеждению, мы должны срочно изменить эту ситуацию, ибо к настоящему времени нами накоплено достаточное количество научных данных как об алгоритмах научения мозга, так и о наиболее эффективных методиках преподавания. Надеюсь, эта книга станет маленьким, но важным шагом к а) глобальному пересмотру программ подготовки учителей и б) скорейшему внедрению лучших инструментов из области когнитивистики в систему школьного и университетского образования.

Полагаю, учителя согласятся с тем, что наука о мозге никоим образом не должна ограничивать их педагогическую свободу. Наоборот, одна из задач моей книги – дать им возможность использовать эту свободу по максимуму. Как однажды сказал Боб Дилан, «в моем представлении героем может быть только тот, кто понимает степень ответственности, которую рождает его свобода». Подлинная педагогическая креативность может проистекать только из знания широчайшего диапазона доступных стратегий, осведомленности об их влиянии на учащихся и умения выбирать лучшие. Принципы, сформулированные в этой книге, совместимы с разными педагогическими подходами, а потому их практическое применение в классе не составит большого труда. Я уповаю на изобретательность учителей: на мой взгляд, именно она является главным источником детского энтузиазма.

Кроме того, в школах будущего родителям должна быть отведена более важная роль. Мамы и папы – основные действующие лица в развитии ребенка. Дом – то место, где дети могут углубить и закрепить знания, которые они приобрели в классе. Семья открыта семь дней в неделю, а значит, может извлечь большую пользу из периодов сна и бодрствования, учения и консолидации. Школам следует посвящать больше времени работе с родителями, ибо это одно из самых эффективных вмешательств: родители могут стать бесценными союзниками учителей и проникательными наблюдателями, от которых не укроются даже малейшие трудности, с которыми сталкиваются их дети.

Наконец, тесное взаимодействие учителей и ученых позволит консолидировать практические и теоретические наработки в сфере педагогики. Если за последние тридцать лет в когнитивистике и науке о мозге достигнут невероятный прогресс, то с педагогическими исследованиями дела обстоят не так хорошо. Научно-исследовательские организации должны всеми силами содействовать проведению крупных исследовательских проектов во всех отраслях науки о мозге и научении – от нейробиологии и нейровизуализации до нейропсихологии нарушений развития, когнитивной психологии и социологии образования. Переход от лаборатории к классу не так прост, как кажется, и нам очень нужны полномасштабные эксперименты в школах. Когнитивная наука может помочь в разработке и оценке инновационных педагогических инструментов.

Как медицина основана на биологии, так и сфера образования должна опираться на систематическую и строгую исследовательскую экосистему, объединяющую учителей, родителей и ученых в непрерывном поиске более эффективных, доказательных стратегий обучения.

Благодарности

Этой книгой я обязан многим людям. Двадцать пять лет назад Майкл Познер и Брюс Маккэндлисс, работавшие тогда в Орегонском университете, убедили меня, что когнитивистика может сыграть важную роль в педагогике и образовании. Вдохновленный, я посетил множество научных совещаний, организованных ими при поддержке Бруно Делла Кьеза и Организации экономического сотрудничества и развития (*Organization for Economic Cooperation and Development, OECD*). Спустя несколько лет мои южноамериканские друзья – Марсела Пенья, Сидарта Рибейро, Мариано Сигман, Алехандро Маиш и Хуан Валле Лисбоа – взяли инициативу в свои руки и обучили целое поколение молодых ученых в рамках незабываемых ежегодных собраний Латиноамериканской школы педагогики, когнитивистики и нейробиологии (*Latin American School for Education, Cognitive and Neural Sciences*). Я бесконечно благодарен им, а также фонду Джеймса С. Макдоннелла и его руководителям Джону Брюэру и Сьюзен Фитцпатрик за предоставленную мне возможность участвовать во всех этих мероприятиях.

Еще один человек, который разделил со мной этот стимулирующий опыт, – моя жена и коллега, Гилен Деан-Ламбертц. Вот уже тридцать два года мы обсуждаем с ней развитие мозга и периодически образование наших детей. Само собой разумеется, что я обязан ей всем, включая скрупулезное вычитывание предыдущих страниц.

Недавно я отметил почти что юбилей: прошло тридцать четыре года, как я начал сотрудничать с лабораториями Жака Меле и Жан-Пьера Шанжэ. Влияние, которое они оказали на мое мышление, сложно переоценить, равно как и влияние других моих близких друзей и коллег. Среди них – Лючия Брага, Лоран Коэн, Наама Фридман, Вероник Изар, Режин Колински, Хосе Мораис, Лионель Наккаш, Кристоф Паллье, Мариано Сигман, Элизабет Спелке, Джош Тененбаум.

Спасибо моему дорогому другу Антонио Баттро, который активно поощрял меня продолжать исследования в области психики, мозга и педагогики. Именно он познакомил меня с Нико, удивительным художником, который любезно позволил воспроизвести в этой книге некоторые из своих картин.

Спасибо Йошуа Бенжио, Алену Шедоталю, Гийому Деану и Давиду Деану, Молли Диллон, Джессике Дюбуа, Дьерди Гергели, Эрику Кнудсену, Лие Крубитцер, Брюсу Маккэндлису, Джошу Тененбауму, Фей Сюй и Роберту Заторре за то, что разрешили воспользоваться результатами своих исследований.

Я также хотел бы поблагодарить все учреждения, которые поддерживали мои исследования на протяжении многих лет, в частности Национальный институт здоровья и медицинских исследований (*Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale, INSERM*), Комиссариат атомной энергетики и альтернативных источников энергии (*Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives, CEA*), Коллеж де Франс (*Collège de France*), Университет Пари-Зюд (*Université Paris-Sud*), Европейский исследовательский совет (*European Research Council, ERC*), Фонд Бетанкур—Шюлле (*Bettencourt Schueller Foundation*). Благодаря им меня всегда окружали блестящие и энергичные студенты и коллеги. Их слишком много, чтобы перечислять их имена здесь, но они обязательно найдут себя в длинном списке публикаций, который приведен ниже. Особо следует упомянуть Анну Уилсон, Дрора Дотана и Кассандру Потье-Уоткинс, с которыми я разрабатывал педагогические программы и вмешательства.

Жан-Мишель Бланке, министр национального образования Франции, оказал мне честь, предложив возглавить свой первый Научный совет. Благодарю его от всего сердца. Я признателен всем членам Совета, включая Эстер Дюфло, Мишеля Файоля, Марка Гюргана, Каролин Гюрон, Елену Пасквинелли, Франка Рамуса, Элизабет Спелке и Джо Зиглера, а также генеральному секретарю Нельсону Вальехо-Гомесу, за их приверженность делу и все, чему они меня научили.

Безусловно, эта книга только выиграла от придирчивого взгляда и правок моих редакторов в издательском доме *Viking*: Венди Вульф и Терезии Сисел. Разумеется, она не попала бы к ним в руки без помощи моих агентов, Джона и Макса из *Brockman Inc*. Спасибо вам за вашу поддержку и бесценную обратную связь.

Йоллинган, Австралия, 7 апреля 2019

Библиография

- Abboud, S., Maidenbaum, S., Dehaene, S., & Amedi, A. (2015). A number-form area in the blind. *Nature Communications*, 6, 6026.
- Adibpour, P., Dubois, J., & Dehaene-Lambertz, G. (2018). Right but not left hemispheric discrimination of faces in infancy. *Nature Human Behaviour*, 2(1), 67–79.
- Ahissar, M., & Hochstein, S. (1993). Attentional control of early perceptual learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 90(12), 5718–5722.
- Almas, A. N., Degnan, K. A., Radulescu, A., Nelson, C. A., Zeanah, C. H., & Fox, N. A. (2012). Effects of early intervention and the moderating effects of brain activity on institutionalized children's social skills at age 8. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109 Suppl 2, 17228–17231.
- Amalric, M., & Dehaene, S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), 4909–4917.
- Amalric, M., & Dehaene, S. (2017). Cortical circuits for mathematical knowledge: Evidence for a major subdivision within the brain's semantic networks. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1740), 20160515.
- Amalric, M., Degenhien, I., & Dehaene, S. (2017). On the role of visual experience in mathematical development: Evidence from blind mathematicians. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 314–323.
- Amalric, M., Wang, L., Pica, P., Figueira, S., Sigman, M., & Dehaene, S. (2017). The language of geometry: Fast comprehension of geometrical primitives and rules in human adults and preschoolers. *PLOS Computational Biology*, 13(1), e1005273.
- Amedi, A., Raz, N., Pianka, P., Malach, R., & Zohary, E. (2003). Early 'visual' cortex activation correlates with superior verbal memory performance in the blind. *Nature Neuroscience*, 6(7), 758–766.
- American Academy of Pediatrics. (2014). School start times for adolescents. *Pediatrics*, 134(3), 642–649.
- Amunts, K., Lenzen, M., Friederici, A. D., Schleicher, A., Morosan, P., Palomero-Gallagher, N., & Zilles, K. (2010). Broca's region: Novel organizational principles and multiple receptor mapping. *PLOS Biology*, 8(9), e1000489.
- Amunts, K., & Zilles, K. (2015). Architectonic mapping of the human brain beyond Brodmann. *Neuron*, 88(6), 1086–1107.
- Anderson, R. C., Wilson, P. T., & Fielding, L. G. (1988). Growth in reading and how children spend their time outside of school. *Reading Research Quarterly*, 23(3), 285–303.
- Ansari, D., & Dhital, B. (2006). Age-related changes in the activation of the intraparietal sulcus during nonsymbolic magnitude processing: An event-related functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(11), 1820–1828.
- Antony, J. W., Gobel, E. W., O'Hare, J. K., Reber, P. J., & Paller, K. A. (2012). Cued memory reactivation during sleep influences skill learning. *Nature Neuroscience*, 15(8), 1114–1116.
- Arnould, L. (1900). *Une âme en prison: Histoire de l'éducation d'une aveugle-sourde-muette de naissance*. Paris: Oudin.
- Arzi, A., Shedlesky, L., Ben-Shaul, M., Nasser, K., Oksenberg, A., Hairston, I. S., & Sobel, N. (2012). Humans can learn new information during sleep. *Nature Neuroscience*, 15(10), 1460–1465.
- Ashcraft, M. H. (2002). Math anxiety: Personal, educational, and cognitive consequences. *Current Directions in Psychological Science*, 11(5), 181–185.
- Au, J., Sheehan, E., Tsai, N., Duncan, G. J., Buschkuhl, M., & Jaeggi, S. M. (2015). Improving fluid intelligence with training on working memory: A meta-analysis. *Psychonomic Bulletin and Review*, 22(2), 366–377.

- Auble, P. M., & Franks, J. J. (1978). The effects of effort toward comprehension on recall. *Memory and Cognition*, 6(1), 20–25.
- Auble, P. M., Franks, J. J., & Soraci, S. A. (1979). Effort toward comprehension: Elaboration or «aha»? *Memory and Cognition*, 7(6), 426–434.
- Avior, G., Fishman, G., Leor, A., Sivan, Y., Kaysar, N., & Derowe, A. (2004). The effect of tonsillectomy and adenoidectomy on inattention and impulsivity as measured by the Test of Variables of Attention (TOVA) in children with obstructive sleep apnea syndrome. *Otolaryngology*, 131(4), 367–371.
- Bahdanau, D., Cho, K., & Bengio, Y. (2014). Neural machine translation by jointly learning to align and translate. arxiv.org/abs/1409.0473.
- Baillargeon, R., & DeVos, J. (1991). Object permanence in young infants: Further evidence. *Child Development*, 62(6), 1227–1246.
- Baillargeon, R., Needham, A., & DeVos, J. (1992). The development of young infants' intuitions about support. *Early Development and Parenting*, 1(2), 69–78.
- Baldwin, D. A., Markman, E. M., Bill, B., Desjardins, R. N., Irwin, J. M., & Tidball, G. (1996). Infants' reliance on a social criterion for establishing word-object relations. *Child Development*, 67(6), 3135–3153.
- Balsam, P. D., & Gallistel, C. R. (2009). Temporal maps and informativeness in associative learning. *Trends in Neurosciences*, 32(2), 73–78.
- Banino, A., Barry, C., Uria, B., Blundell, C., Lillicrap, T., Mirowski, P., Kumaran, D. (2018). Vector-based navigation using grid-like representations in artificial agents. *Nature*, 557(7705), 429–433.
- Bao, S., Chan, V. T., & Merzenich, M. M. (2001). Cortical remodelling induced by activity of ventral tegmental dopamine neurons. *Nature*, 412(6842), 79–83.
- Bavelier, D., Green, C. S., Han, D. H., Renshaw, P. F., Merzenich, M. M., & Gentile, D. A. (2011). Brains on video games. *Nature Reviews Neuroscience*, 12(12), 763–768.
- Beckers, T., Miller, R. R., De Houwer, J., & Urushihara, K. (2006). Reasoning rats: Forward blocking in Pavlovian animal conditioning is sensitive to constraints of causal inference. *Journal of Experimental Psychology: General*, 135(1), 92–102.
- Bedny, M. (2017). Evidence from blindness for a cognitively pluripotent cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 21(9), 637–648.
- Bedny, M., Pascual-Leone, A., Dodell-Feder, D., Fedorenko, E., & Saxe, R. (2011). Language processing in the occipital cortex of congenitally blind adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(11), 4429–4434.
- Behne, T., Carpenter, M., Call, J., & Tomasello, M. (2005). Unwilling versus unable: Infants' understanding of intentional action. *Developmental Psychology*, 41(2), 328–337.
- Bekinschtein, T. A., Dehaene, S., Rohaut, B., Tadel, F., Cohen, L., & Naccache, L. (2009). Neural signature of the conscious processing of auditory regularities. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1672–1677.
- Belle, M., Godefroy, D., Couly, G., Malone, S. A., Collier, F., Giacobini, P., & Chédotal, A. (2017). Tridimensional visualization and analysis of early human development. *Cell*, 169(1), 161–173.
- Bendor, D., & Wilson, M. A. (2012). Biasing the content of hippocampal replay during sleep. *Nature Neuroscience*, 15(10), 1439–1444.
- Berens, A. E., & Nelson, C. A. (2015). The science of early adversity: Is there a role for large institutions in the care of vulnerable children? *Lancet*, 386(9991), 388–398.
- Bergman-Nutley, S., & Klingberg, T. (2014). Effect of working memory training on working memory, arithmetic and following instructions. *Psychological Research*, 78(6), 869–877.
- Berkes, P., Orbán, G., Lengyel, M., & Fiser, J. (2011). Spontaneous cortical activity reveals hallmarks of an optimal internal model of the environment. *Science*, 331(6013), 83–87.

- Bermudez, P., Lerch, J. P., Evans, A. C., & Zatorre, R. J. (2009). Neuroanatomical correlates of musicianship as revealed by cortical thickness and voxel-based morphometry. *Cerebral Cortex*, 19(7), 1583–1596.
- Bernal, S., Dehaene-Lambertz, G., Millotte, S., & Christophe, A. (2010). Two-year-olds compute syntactic structure on-line. *Developmental Science*, 13(1), 69–76.
- Bessa, C., Maciel, P., & Rodrigues, A. J. (2013). Using *C. elegans* to decipher the cellular and molecular mechanisms underlying neurodevelopmental disorders. *Molecular Neurobiology*, 48(3), 465–489.
- Bevins, R. A. (2001). Novelty seeking and reward: Implications for the study of high-risk behaviors. *Current Directions in Psychological Science*, 10(6), 189–193.
- Bialystok, E., Craik, F. I. M., Green, D. W., & Gollan, T. H. (2009). Bilingual minds. *Psychological Science in the Public Interest*, 10(3), 89–129.
- Binder, J. R., Medler, D. A., Westbury, C. F., Liebenthal, E., & Buchanan, L. (2006). Tuning of the human left fusiform gyrus to sublexical orthographic structure. *NeuroImage*, 33(2), 739–748.
- Blair, C., & Raver, C. C. (2014). Closing the achievement gap through modification of neurocognitive and neuroendocrine function: Results from a cluster randomized controlled trial of an innovative approach to the education of children in kindergarten. *PLOS ONE*, 9(11), e112393.
- Blair, K. P., Rosenberg-Lee, M., Tsang, J. M., Schwartz, D. L., & Menon, V. (2012). Beyond natural numbers: Negative number representation in parietal cortex. *Frontiers in Human Neuroscience*, 6, 7.
- Bliss, T. V., & Lomo, T. (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *Journal of Physiology*, 232(2), 331–356.
- Bock, A. S., Binda, P., Benson, N. C., Bridge, H., Watkins, K. E., & Fine, I. (2015). Resting-state retinotopic organization in the absence of retinal input and visual experience. *Journal of Neuroscience*, 35(36), 12366–12382.
- Bonawitz, E., Shaft, P., Gweon, H., Goodman, N. D., Spelke, E., & Schulz, L. (2011). The double-edged sword of pedagogy: Instruction limits spontaneous exploration and discovery. *Cognition*, 120(3), 322–330.
- Bond, R., & Smith, P. B. (1996). Culture and conformity: A meta-analysis of studies using Asch's (1952b, 1956) line judgment task. *Psychological Bulletin*, 119(1), 111–137.
- Borst, G., Poirel, N., Pineau, A., Cassotti, M., & Houdé, O. (2013). Inhibitory control efficiency in a Piaget-like class-inclusion task in school-age children and adults: A developmental negative priming study. *Developmental Psychology*, 49(7), 1366–1374.
- Bouhali, F., Thiebaut de Schotten, M., Pinel, P., Poupon, C., Mangin, J.-F., Dehaene, S., & Cohen, L. (2014). Anatomical connections of the visual word form area. *Journal of Neuroscience*, 34(46), 15402–15414.
- Bradley, M. M., Costa, V. D., Ferrari, V., Codispoti, M., Fitzsimmons, J. R., & Lang, P. J. (2015). Imaging distributed and massed repetitions of natural scenes: Spontaneous retrieval and maintenance. *Human Brain Mapping*, 36(4), 1381–1392.
- Braga, L. W., Amemiya, E., Tauil, A., Sugueida, D., Lacerda, C., Klein, E., ... Dehaene, S. (2017). Tracking adult literacy acquisition with functional MRI: A single-case study. *Mind, Brain, and Education*, 11(3), 121–132.
- Brewer, J. B., Zhao, Z., Desmond, J. E., Glover, G. H., & Gabrieli, J. D. (1998). Making memories: Brain activity that predicts how well visual experience will be remembered. *Science*, 281(5380), 1185–1187.
- Brodmann, K. (1909). *Vergleichende Lokalisationslehre der Grosshirnrinde [Localisation in the cerebral cortex]*. Leipzig: Barth.
- Bromberg-Martin, E. S., & Hikosaka, O. (2009). Midbrain dopamine neurons signal preference for advance information about upcoming rewards. *Neuron*, 63(1), 119–126.
- Bruce, D. J., Evans, C. R., Fenwick, P. B. C., & Spencer, V. (1970). Effect of Presenting Novel Verbal Material during Slow-wave Sleep. *Nature*, 25(5235), 873.

- Brun, V. H., Leutgeb, S., Wu, H.-Q., Schwarcz, R., Witter, M. P., Moser, E. I., & Moser, M.-B. (2008). Impaired spatial representation in CA1 after lesion of direct input from entorhinal cortex. *Neuron*, 57(2), 290–302.
- Buon, M., Jacob, P., Margules, S., Brunet, I., Dutat, M., Cabrol, D., & Dupoux, E. (2014). Friend or foe? Early social evaluation of human interactions. *PLOS ONE*, 9(2), e88612.
- Butler, A. C., Karpicke, J. D., & Roediger, H. L. (2008). Correcting a metacognitive error: Feedback increases retention of low-confidence correct responses. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 34(4), 918–928.
- Butterworth, B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 534–541.
- Byers-Heinlein, K., & Werker, J. F. (2009). Monolingual, bilingual, trilingual: Infants' language experience influences the development of a word-learning heuristic. *Developmental Science*, 12(5), 815–823.
- Callan, D. E., & Schweighofer, N. (2010). Neural correlates of the spacing effect in explicit verbal semantic encoding support the deficient-processing theory. *Human Brain Mapping*, 31(4), 645–659.
- Campbell, F. A., Pungello, E. P., Burchinal, M., Kainz, K., Pan, Y., Wasik, B. H., Ramey, C. T. (2012). Adult outcomes as a function of an early childhood educational program: An Abecedarian Project follow-up. *Developmental Psychology*, 48(4), 1033–1043.
- Campbell, F., Conti, G., Heckman, J. J., Moon, S. H., Pinto, R., Pungello, E., & Pan, Y. (2014). Early childhood investments substantially boost adult health. *Science*, 343(6178), 1478–1485.
- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J., & Pelphrey, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLOS Biology*, 4(5), e125.
- Cantlon, J. F., & Li, R. (2013). Neural activity during natural viewing of Sesame Street statistically predicts test scores in early childhood. *PLOS Biology*, 11(1), e1001462.
- Cardoso-Leite, P., & Bavelier, D. (2014). Video game play, attention, and learning: How to shape the development of attention and influence learning? *Current Opinion in Neurology*, 27(2), 185–191.
- Carey, S., & Bartlett, E. (1978). Acquiring a single new word. *Papers and Reports on Child Language Development*, 15, 17–29.
- Caroni, P., Donato, F., & Muller, D. (2012). Structural plasticity upon learning: Regulation and functions. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(7), 478–490.
- Carreiras, M., Seghier, M. L., Baquero, S., Estevez, A., Lozano, A., Devlin, J. T., & Price, C. J. (2009). An anatomical signature for literacy. *Nature*, 461(7266), 983–986.
- Carrier, M., & Pashler, H. (1992). The influence of retrieval on retention. *Memory and Cognition*, 20(6), 633–642.
- Castles, A., Rastle, K., & Nation, K. (2018). Ending the reading wars: Reading acquisition from novice to expert. *Psychological Science in the Public Interest*, 19(1), 5–51.
- Castro-Caldas, A., Petersson, K. M., Reis, A., Stone-Elander, S., & Ingvar, M. (1998). The illiterate brain: Learning to read and write during childhood influences the functional organization of the adult brain. *Brain*, 121(6), 1053–1063.
- Cepeda, N. J., Coburn, N., Rohrer, D., Wixted, J. T., Mozer, M. C., & Pashler, H. (2009). Optimizing distributed practice: Theoretical analysis and practical implications. *Experimental Psychology*, 56(4), 236–246.
- Cepeda, N. J., Pashler, H., Vul, E., Wixted, J. T., & Rohrer, D. (2006). Distributed practice in verbal recall tasks: A review and quantitative synthesis. *Psychological Bulletin*, 132(3), 354–380.
- Cesana-Arlotti, N., Martín, A., Téglás, E., Vorobyova, L., Cetnarski, R., & Bonatti, L. L. (2018). Precursors of logical reasoning in preverbal human infants. *Science*, 359(6381), 1263–1266.
- Chafee, M. V. (2013). A scalar neural code for categories in parietal cortex: Representing cognitive variables as «more» or «less». *Neuron*, 77(1), 7–9.

- Chakraborty, M., & Jarvis, E. D. (2015). Brain evolution by brain pathway duplication. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 370(1684), 20150056.
- Chang, C. H. C., Pallier, C., Wu, D. H., Nakamura, K., Jobert, A., Kuo, W.-J., & Dehaene, S. (2015). Adaptation of the human visual system to the statistics of letters and line configurations. *NeuroImage*, 120, 428–440.
- Chao, Z. C., Takaura, K., Wang, L., Fujii, N., & Dehaene, S. (2018). Large-scale cortical networks for hierarchical prediction and prediction error in the primate brain. *Neuron*, 100(5), 1252–1266.
- Chen, Z., & Wilson, M. A. (2017). Deciphering neural codes of memory during sleep. *Trends in Neurosciences*, 40(5), 260–275.
- Chiao, J. Y. (2010). Neural basis of social status hierarchy across species. *Current Opinion in Neurobiology*, 20(6), 803–809.
- Cho, K., Courville, A., & Bengio, Y. (2015). Describing multimedia content using attention-based encoder-decoder networks. *IEEE Transactions on Multimedia*, 17(11), 1875–1886.
- Chun, M. M., & Marois, R. (2002). The dark side of visual attention. *Current Opinion in Neurobiology*, 12(2), 184–189.
- Clark, E. V. (1988). On the logic of contrast. *Journal of Child Language*, 15(2), 317–335.
- Claro, S., Paunesku, D., & Dweck, C. S. (2016). Growth mindset tempers the effects of poverty on academic achievement. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(31), 8664–8668.
- Cohen, L., Dehaene, S., McCormick, S., Durant, S., & Zanker, J. M. (2016). Brain mechanisms of recovery from pure alexia: A single case study with multiple longitudinal scans. *Neuropsychologia*, 91, 36–49.
- Cohen, L., Dehaene, S., Vinckier, F., Jobert, A., & Montavont, A. (2008). Reading normal and degraded words: Contribution of the dorsal and ventral visual pathways. *NeuroImage*, 40(1), 353–366.
- Conel, J. L. (1939–67). *The postnatal development of the human cerebral cortex* (Vols. 1–8). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Constantinescu, A. O., O'Reilly, J. X., & Behrens, T. E. J. (2016). Organizing conceptual knowledge in humans with a gridlike code. *Science*, 352(6292), 1464–1468.
- Corralo, G., Sackur, J., Dehaene, S., & Sigman, M. (2008). Limits on introspection: Distorted subjective time during the dual-task bottleneck. *Psychological Science*, 19(11), 1110–1117.
- Cortese, S., Brown, T. E., Corkum, P., Gruber, R., O'Brien, L. M., Stein, M., ... Owens, J. (2013). Assessment and management of sleep problems in youths with attention-deficit/hyperactivity disorder. *Journal of the American Academy of Child and Adolescent Psychiatry*, 52(8), 784–796.
- Costa, A., & Sebastián-Gallés, N. (2014). How does the bilingual experience sculpt the brain? *Nature Reviews Neuroscience*, 15(5), 336–345.
- Courchesne, E., Pierce, K., Schumann, C. M., Redcay, E., Buckwalter, J. A., Kennedy, D. P., & Morgan, J. (2007). Mapping early brain development in autism. *Neuron*, 56(2), 399–413.
- Courtney, S. M., Ungerleider, L. G., Keil, K., & Haxby, J. V. (1997). Transient and sustained activity in a distributed neural system for human working memory. *Nature*, 386(6625), 608–611.
- Craik, F. I. M., & Tulving, E. (1975). Depth of processing and the retention of words in episodic memory. *Journal of Experimental Psychology: General*, 104(3), 268–294.
- Csibra, G., & Gergely, G. (2009). Natural pedagogy. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(4), 148–153.
- Çukur, T., Nishimoto, S., Huth, A. G., & Gallant, J. L. (2013). Attention during natural vision warps semantic representation across the human brain. *Nature Neuroscience*, 16(6), 763–770.
- Curran, T., Tucker, D. M., Kutas, M., & Posner, M. I. (1993). Topography of the N400: Brain electrical activity reflecting semantic expectancy. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 88(3), 188–209.

- Cyr, M., & Shi, R. (2013). Development of abstract grammatical categorization in infants. *Child Development*, 84(2), 617–629.
- Darki, F., Peyrard-Janvid, M., Matsson, H., Kere, J., & Klingberg, T. (2012). Three dyslexia susceptibility genes, DYX1C1, DCDC2, and KIAA0319, affect temporo-parietal white matter structure. *Biological Psychiatry*, 72(8), 671–676.
- Deen, B., Richardson, H., Dilks, D. D., Takahashi, A., Keil, B., Wald, L. L., Saxe, R. (2017). Organization of high-level visual cortex in human infants. *Nature Communications*, 8, 13995.
- Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber-Fechner law: A logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(4), 145–147.
- Dehaene, S. (2005). Evolution of human cortical circuits for reading and arithmetic: The «neuronal recycling» hypothesis. // S. Dehaene, J.-R. Duhamel, M. D. Hauser, & G. Rizzolatti (Eds.), *From monkey brain to human brain* (pp. 133–157). Cambridge, MA: MIT Press.
- Dehaene, S. (2007). Symbols and quantities in parietal cortex: Elements of a mathematical theory of number representation and manipulation. // P. Haggard, Y. Rossetti, & M. Kawato (Eds.), *Attention and performance XXII: Sensorimotor foundations of higher cognition* (pp. 527–574). Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Dehaene, S. (2009). *Reading in the brain: The new science of how we read*. New York, NY: Penguin Group.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics* (2nd ed.). New York, NY: Oxford University Press.
- Dehaene, S. (2014). *Consciousness and the brain*. New York, NY: Penguin Group.
- Dehaene, S., & Akhavan, R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(2), 314–326.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and numerical magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122(3), 371–396.
- Dehaene, S., & Changeux, J. P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70(2), 200–227.
- Dehaene, S., Changeux, J. P., Naccache, L., Sackur, J., & Sergent, C. (2006). Conscious, preconscious, and subliminal processing: A testable taxonomy. *Trends in Cognitive Sciences*, 10(5), 204–211.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384–398.
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234–244.
- Dehaene, S., Cohen, L., Sigman, M., & Vinckier, F. (2005). The neural code for written words: A proposal. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(7), 335–341.
- Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 626–641.
- Dehaene, S., Izard, V., Pica, P., & Spelke, E. (2006). Core knowledge of geometry in an Amazonian indigene group. *Science*, 311(5759), 381–384.
- Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science*, 320(5880), 1217–1220.
- Dehaene, S., Jobert, A., Naccache, L., Ciuciu, P., Poline, J.-B., Le Bihan, D., & Cohen, L. (2004). Letter binding and invariant recognition of masked words: Behavioral and neuroimaging evidence. *Psychological Science*, 15(5), 307–313.
- Dehaene, S., Kerszberg, M., & Changeux, J. P. (1998). A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95(24), 14529–14534.

- Dehaene, S., Lau, H., & Kouider, S. (2017). What is consciousness, and could machines have it? *Science*, 358(6362), 486–492.
- Dehaene, S., & Marques, J. F. (2002). Cognitive neuroscience: Scalar variability in price estimation and the cognitive consequences of switching to the euro. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 55(3), 705–731.
- Dehaene, S., Meyniel, F., Wacongne, C., Wang, L., & Pallier, C. (2015). The neural representation of sequences: From transition probabilities to algebraic patterns and linguistic trees. *Neuron*, 88(1), 2–19.
- Dehaene, S., & Naccache, L. (2001). Towards a cognitive neuroscience of consciousness: Basic evidence and a workspace framework. *Cognition*, 79(1–2), 1–37.
- Dehaene, S., Naccache, L., Cohen, L., Le Bihan, D., Mangin, J.-F., Poline, J.-B., & Rivière, D. (2001). Cerebral mechanisms of word masking and unconscious repetition priming. *Nature Neuroscience*, 4(7), 752–758.
- Dehaene, S., Pegado, F., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes Filho, G., Jobert, A., Cohen, L. (2010). How learning to read changes the cortical networks for vision and language. *Science*, 330(6009), 1359–1364.
- Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Hertz-Pannier, L. (2002). Functional neuroimaging of speech perception in infants. *Science*, 298(5600), 2013–2015.
- Dehaene-Lambertz, G., Hertz-Pannier, L., Dubois, J., Meriaux, S., Roche, A., Sigman, M., & Dehaene, S. (2006). Functional organization of perisylvian activation during presentation of sentences in preverbal infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(38), 14240–14245.
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLOS Biology*, 16(3), e2004103.
- Dehaene-Lambertz, G., & Spelke, E. S. (2015). The infancy of the human brain. *Neuron*, 88(1), 93–109.
- de Lavilléon, G., Lacroix, M. M., Rondi-Reig, L., & Benchenane, K. (2015). Explicit memory creation during sleep demonstrates a causal role of place cells in navigation. *Nature Neuroscience*, 18(4), 493–495.
- Denison, S., & Xu, F. (2010). Integrating physical constraints in statistical inference by 11-month-old infants. *Cognitive Science*, 34(5), 885–908.
- Dennett, D. C. (1995). *Darwin's dangerous idea: Evolution and the meanings of life*. New York, NY: Simon and Schuster.
- Desimone, R., & Duncan, J. (1995). Neural mechanisms of selective visual attention. *Annual Review of Neuroscience*, 18, 193–222.
- D'Esposito, M., & Grossman, M. (1996). The physiological basis of executive function and working memory. *Neuroscientist*, 2(6), 345–352.
- Diamond, A., & Doar, B. (1989). The performance of human infants on a measure of frontal cortex function, the delayed response task. *Developmental Psychobiology*, 22(3), 271–294.
- Diamond, A., & Goldman-Rakic, P. S. (1989). Comparison of human infants and rhesus monkeys on Piaget's AB task: Evidence for dependence on dorsolateral prefrontal cortex. *Experimental Brain Research*, 74(1), 24–40.
- Diamond, A., & Lee, K. (2011). Interventions shown to aid executive function development in children 4 to 12 years old. *Science*, 333(6045), 959–964.
- Diekelmann, S., & Born, J. (2010). The memory function of sleep. *Nature Reviews Neuroscience*, 11(2), 114–126.
- Diester, I., & Nieder, A. (2007). Semantic associations between signs and numerical categories in the prefrontal cortex. *PLOS Biology*, 5(11), e294.
- Diester, I., & Nieder, A. (2010). Numerical values leave a semantic imprint on associated signs in monkeys. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(1), 174–183.

- Ditz, H. M., & Nieder, A. (2015). Neurons selective to the number of visual items in the corvid songbird endbrain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(25), 7827–7832.
- Doeller, C. F., Barry, C., & Burgess, N. (2010). Evidence for grid cells in a human memory network. *Nature*, 463(7281), 657–661.
- Donato, F., Rompani, S. B., & Caroni, P. (2013). Parvalbumin-expressing basket-cell network plasticity induced by experience regulates adult learning. *Nature*, 504(7479), 272–276.
- Draganski, B., Gaser, C., Busch, V., Schuierer, G., Bogdahn, U., & May, A. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427(6972), 311–312.
- Dubois, J., Dehaene-Lambertz, G., Perrin, M., Mangin, J.-F., Cointepas, Y., Duchesnay, E., ... Hertz-Pannier, L. (2007). Asynchrony of the early maturation of white matter bundles in healthy infants: Quantitative landmarks revealed noninvasively by diffusion tensor imaging. *Human Brain Mapping*, 29, 14–27.
- Dubois, J., Hertz-Pannier, L., Cachia, A., Mangin, J.-F., Le Bihan, D., & Dehaene-Lambertz, G. (2009). Structural asymmetries in the infant language and sensori-motor networks. *Cerebral Cortex*, 19(2), 414–423.
- Dubois, J., Poupon, C., Thirion, B., Simonnet, H., Kulikova, S., Leroy, F., ... Dehaene-Lambertz, G. (2015). Exploring the early organization and maturation of linguistic pathways in the human infant brain. *Cerebral Cortex*, 26(5), 2283–2298.
- Dumontheil, I., & Klingberg, T. (2011). Brain activity during a visuospatial working memory task predicts arithmetical performance 2 years later. *Cerebral Cortex*, 22(5), 1078–1085.
- Duncan, J. (2003). Intelligence tests predict brain response to demanding task events. *Nature Neuroscience*, 6(3), 207–208.
- Duncan, J. (2010). The multiple-demand (MD) system of the primate brain: Mental programs for intelligent behaviour. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(4), 172–179.
- Duncan, J. (2013). The structure of cognition: Attentional episodes in mind and brain. *Neuron*, 80(1), 35–50.
- Dundas, E. M., Plaut, D. C., & Behrmann, M. (2013). The joint development of hemispheric lateralization for words and faces. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(2), 348–358.
- Dunlosky, J., Rawson, K. A., Marsh, E. J., Nathan, M. J., & Willingham, D. T. (2013). Improving students' learning with effective learning techniques: Promising directions from cognitive and educational psychology. *Psychological Science in the Public Interest*, 14(1), 4–58.
- Dunster, G. P., Iglesia, L. de la, Ben-Hamo, M., Nave, C., Fleischer, J. G., Panda, S., & Iglesia, H. O. de la. (2018). Sleepmore in Seattle: Later school start times are associated with more sleep and better performance in high school students. *Science Advances*, 4(12), eaau6200.
- Duyme, M., Dumaret, A.-C., & Tomkiewicz, S. (1999). How can we boost IQs of «dull children»? A late adoption study. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(15), 8790–8794.
- Dweck, C. S. (2006). *Mindset: The new psychology of success*. New York, NY: Random House.
- Egyed, K., Király, I., & Gergely, G. (2013). Communicating shared knowledge in infancy. *Psychological Science*, 24(7), 1348–1353.
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Stahl, S. A., & Willows, D. M. (2001). Systematic phonics instruction helps students learn to read: Evidence from the National Reading Panel's meta-analysis. *Review of Educational Research*, 71(3), 393–447.
- Ellis, A. W., & Lambon Ralph, M. A. (2000). Age of acquisition effects in adult lexical processing reflect loss of plasticity in maturing systems: Insights from connectionist networks. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 26(5), 1103–1123.
- Elman, J. L., Bates, E. A., Johnson, M. H., Karmiloff-Smith, A., Parisi, D., & Plunkett, K. (1996). *Rethinking innateness: A connectionist perspective on development*. Cambridge, MA: MIT Press.

- Elsayed, G. F., Shankar, S., Cheung, B., Papernot, N., Kurakin, A., Goodfellow, I., & Sohl-Dickstein, J. (2018). Adversarial examples that fool both human and computer vision. <https://arxiv.org/abs/1802.08195v1>.
- Elston, G. N. (2003). Cortex, cognition and the cell: New insights into the pyramidal neuron and prefrontal function. *Cerebral Cortex*, 13(11), 1124–1138.
- Emmons, W. H., & Simon, C. W. (1956). The non-recall of material presented during sleep. *The American Journal of Psychology*, 69, 76–81.
- Epelbaum, M., Milleret, C., Buisseret, P., & Duffer, J. L. (1993). The sensitive period for strabismic amblyopia in humans. *Ophthalmology*, 100(3), 323–327.
- Esseily, R., Rat-Fischer, L., Somogyi, E., O'Regan, K. J., & Fagard, J. (2016). Humour production may enhance observational learning of a new tool-use action in 18-month-old infants. *Cognition and Emotion*, 30(4), 817–825.
- Ester, E. F., Sprague, T. C., & Serences, J. T. (2015). Parietal and frontal cortex encode stimulus-specific mnemonic representations during visual working memory. *Neuron*, 87(4), 893–905.
- Everaert, M. B. H., Huybregts, M. A. C., Chomsky, N., Berwick, R. C., & Bolhuis, J. J. (2015). Structures, not strings: Linguistics as part of the cognitive sciences. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(12), 729–743.
- Fanselow, M. S. (1998). Pavlovian conditioning, negative feedback, and blocking: Mechanisms that regulate association formation. *Neuron*, 20(4), 625–627.
- Fattal, I., Friedmann, N., & Fattal-Valevski, A. (2011). The crucial role of thiamine in the development of syntax and lexical retrieval: A study of infantile thiamine deficiency. *Brain*, 134(6), 1720–1739.
- Fawcett, S. L., Wang, Y.-Z., & Birch, E. E. (2005). The critical period for susceptibility of human stereopsis. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 46(2), 521–525.
- Fischer, M. H. (2003). Cognitive representation of negative numbers. *Psychological Science*, 14(3), 278–282.
- Fisher, A. V., Godwin, K. E., & Seltman, H. (2014). Visual environment, attention allocation, and learning in young children when too much of a good thing may be bad. *Psychological Science*, 25(7), 1362–1370.
- Fitzgerald, J. K., Freedman, D. J., Fanini, A., Bennur, S., Gold, J. I., & Assad, J. A. (2013). Biased associative representations in parietal cortex. *Neuron*, 77(1), 180–191.
- Fitzsimonds, R. M., Song, H.-J., & Poo, M.-M. (1997). Propagation of activity-dependent synaptic depression in simple neural networks. *Nature*, 388(6641), 439–448.
- Flechsig, P. (1876). *Die Leitungsbahnen im Gehirn und Rückenmark des Menschen auf Grund Entwicklungsgeschichtlicher Untersuchungen*. Leipzig: Engelmann.
- Flege, J. E., Munro, M. J., & MacKay, I. R. (1995). Factors affecting strength of perceived foreign accent in a second language. *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(5), 3125–3134.
- Fleming, S. M., Weil, R. S., Nagy, Z., Dolan, R. J., & Rees, G. (2010). Relating introspective accuracy to individual differences in brain structure. *Science*, 329(5998), 1541–1543.
- Fodor, J. A. (1975). *The language of thought*. New York, NY: Thomas Y. Crowell.
- Fodor, J. A., & Pylyshyn, Z. W. (1988). Connectionism and cognitive architecture: A critical analysis. *Cognition*, 28(1–2), 3–71.
- Fodor, J., & McLaughlin, B. P. (1990). Connectionism and the problem of systematicity: Why Smolensky's solution doesn't work. *Cognition*, 35(2), 183–204.
- Frank, M. C., Everett, D. L., Fedorenko, E., & Gibson, E. (2008). Number as a cognitive technology: Evidence from Pirahã language and cognition. *Cognition*, 108(3), 819–824.
- Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410–8415.

- Friederici, A. D. (2002). Towards a neural basis of auditory sentence processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 6(2), 78–84.
- Friedmann, N., Kerbel, N., & Shvimer, L. (2010). Developmental attentional dyslexia. *Cortex*, 46(10), 1216–1237.
- Friedmann, N., & Rusou, D. (2015). Critical period for first language: The crucial role of language input during the first year of life. *Current Opinion in Neurobiology*, 35, 27–34.
- Friedrich, M., Wilhelm, I., Born, J., & Friederici, A. D. (2015). Generalization of word meanings during infant sleep. *Nature Communications*, 6, 6004.
- Friston, K. (2005). A theory of cortical responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 360(1456), 815–836.
- Froemke, R. C., Merzenich, M. M., & Schreiner, C. E. (2007). A synaptic memory trace for cortical receptive field plasticity. *Nature*, 450(7168), 425–429.
- Fukuchi-Shimogori, T., & Grove, E. A. (2001). Neocortex patterning by the secreted signaling molecule FGF8. *Science*, 294(5544), 1071–1074.
- Fyhn, M., Molden, S., Witter, M. P., Moser, E. I., & Moser, M.-B. (2004). Spatial representation in the entorhinal cortex. *Science*, 305(5688), 1258–1264.
- Galaburda, A. M., LoTurco, J., Ramus, F., Fitch, R. H., & Rosen, G. D. (2006). From genes to behavior in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience*, 9(10), 1213–1217.
- Galgali, A. R., & Mante, V. (2018). Set in one's thoughts. *Nature Neuroscience*, 21(4), 459–460.
- Gallistel, C. R. (1990). *The organization of learning*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Gaser, C., & Schlaug, G. (2003). Brain structures differ between musicians and nonmusicians. *Journal of Neuroscience*, 23(27), 9240–9245.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004). Working memory skills and educational attainment: Evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 1–16.
- Geary, D. C. (2011). Cognitive predictors of achievement growth in mathematics: A five-year longitudinal study. *Developmental Psychology*, 47(6), 1539–1552.
- Genzel, L., Rossato, J. I., Jacobse, J., Grieves, R. M., Spooner, P. A., Battaglia, F. P., Morris, R. G. M. (2017). The yin and yang of memory consolidation: Hippocampal and neocortical. *PLOS Biology*, 15(1), e2000531.
- George, D., Lehrach, W., Kinsky, K., Lázaro-Gredilla, M., Laan, C., Marthi, B., Phoenix, D. S. (2017). A generative vision model that trains with high data efficiency and breaks text-based CAPTCHAs. *Science*, 358(6368).
- Gerber, P., Schlaffke, L., Heba, S., Greenlee, M. W., Schultz, T., & Schmidt-Wilcke, T. (2014). Juggling revisited – a voxel-based morphometry study with expert jugglers. *NeuroImage*, 95, 320–325.
- Gergely, G., Bekkering, H., & Király, I. (2002). Rational imitation in preverbal infants. *Nature*, 415(6873), 755.
- Gergely, G., & Csibra, G. (2003). Teleological reasoning in infancy: The naïve theory of rational action. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(7), 287–292.
- Gerhand, S., & Barry, C. (1999). Age of acquisition, word frequency, and the role of phonology in the lexical decision task. *Memory and Cognition*, 27(4), 592–602.
- Gertler, P., Heckman, J., Pinto, R., Zanolini, A., Vermeersch, C., Walker, S., Grantham-McGregor, S. (2014). Labor market returns to an early childhood stimulation intervention in Jamaica. *Science*, 344(6187), 998–1001.
- Glass, A. L., & Kang, M. (2018). Dividing attention in the classroom reduces exam performance. *Educational Psychology*, 39(3), 395–408.
- Goldman-Rakic, P. S. (1995). Cellular basis of working memory. *Neuron*, 14(3), 477–485.

- Golestani, N., Molko, N., Dehaene, S., Le Bihan, D., & Pallier, C. (2007). Brain structure predicts the learning of foreign speech sounds. *Cerebral Cortex*, 17(3), 575–582.
- Golub, M. D., Sadtler, P. T., Oby, E. R., Quick, K. M., Ryu, S. I., Tyler-Kabara, E. C., Yu, B. M. (2018). Learning by neural reassociation. *Nature Neuroscience*, 21(4), 607–616.
- Goodfellow, I. J., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., Bengio, Y. (2014). Generative adversarial networks. arxiv.org/abs/1406.2661.
- Goodman, C. S., & Shatz, C. J. (1993). Developmental mechanisms that generate precise patterns of neuronal connectivity. *Cell*, 72 Suppl, 77–98.
- Goodman, N. D., Ullman, T. D., & Tenenbaum, J. B. (2011). Learning a theory of causality. *Psychological Review*, 118(1), 110–119.
- Gopnik, A., Glymour, C., Sobel, D. M., Schulz, L. E., Kushnir, T., & Danks, D. (2004). A theory of causal learning in children: Causal maps and Bayes nets. *Psychological Review*, 111(1), 3–32.
- Gopnik, A., Meltzoff, A. N., & Kuhl, P. K. (1999). *The scientist in the crib: What early learning tells us about the mind*. New York, NY: William Morrow.
- Gottlieb, J., Oudeyer, P.-Y., Lopes, M., & Baranes, A. (2013). Information-seeking, curiosity, and attention: Computational and neural mechanisms. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(11), 585–593.
- Goupil, L., Romand-Monnier, M., & Kouider, S. (2016). Infants ask for help when they know they don't know. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(13), 3492–3496.
- Grainger, J., & Whitney, C. (2004). Does the human mind read words as a whole? *Trends in Cognitive Sciences*, 8(2), 58–59.
- Grantham-McGregor, S. M., Powell, C. A., Walker, S. P., & Himes, J. H. (1991). Nutritional supplementation, psychosocial stimulation, and mental development of stunted children: The Jamaican Study. *Lancet*, 338(8758), 1–5.
- Green, C. S., & Bavelier, D. (2003). Action video game modifies visual selective attention. *Nature*, 423(6939), 534–537.
- Groen, G. J., & Parkman, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, 79(4), 329–343.
- Grothendieck, A. (1986). Récoltes et semailles: Réflexions et témoignage sur un passé de mathématicien. quarante-deux.org/archives/klein/prefaces/Romans_1965-1969/Recoltes_et_semailles.pdf.
- Gruber, M. J., Gelman, B. D., & Ranganath, C. (2014). States of curiosity modulate hippocampus-dependent learning via the dopaminergic circuit. *Neuron*, 84(2), 486–496.
- Guerguiev, J., Lillicrap, T. P., & Richards, B. A. (2017). Towards deep learning with segregated dendrites. *ELife*, 6, e22901.
- Gullick, M. M., & Wolford, G. (2013). Understanding less than nothing: Children's neural response to negative numbers shifts across age and accuracy. *Frontiers in Psychology*, 4, 584.
- Gweon, H., Tenenbaum, J. B., & Schulz, L. E. (2010). Infants consider both the sample and the sampling process in inductive generalization. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(20), 9066–9071.
- Habibi, A., Damasio, A., Ilari, B., Elliott Sachs, M., & Damasio, H. (2018). Music training and child development: A review of recent findings from a longitudinal study. *Annals of the New York Academy of Sciences*.
- Hafting, T., Fyhn, M., Molden, S., Moser, M.-B., & Moser, E. I. (2005). Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex. *Nature*, 436(7052), 801–806.
- Hahne, A., & Friederici, A. D. (1999). Electrophysiological evidence for two steps in syntactic analysis: Early automatic and late controlled processes. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(2), 194–205.
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the «number sense»: The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental*

Psychology, 44(5), 1457–1465.

Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(7), 374–382.

Hannagan, T., Nieder, A., Viswanathan, P., & Dehaene, S. (2017). A random-matrix theory of the number sense. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 373(1740), 20170253.

Hartshorne, J. K., Tenenbaum, J. B., & Pinker, S. (2018). A critical period for second language acquisition: Evidence from 2/3 million English speakers. *Cognition*, 177, 263–277.

Hassabis, D., Kumaran, D., Summerfield, C., & Botvinick, M. (2017). Neuroscience-inspired artificial intelligence. *Neuron*, 95(2), 245–258.

Hattie, J. (2008). *Visible learning*. London and New York, NY: Routledge.

Hattie, J. (2017). *L'apprentissage visible pour les enseignants: Connaître son impact pour maximiser le rendement des élèves*. Québec: Presses de l'Université du Québec.

Hauser, M. D., Chomsky, N., & Fitch, W. T. (2002). The faculty of language: What is it, who has it, and how did it evolve? *Science*, 298(5598), 1569–1579.

Hauser, M. D., & Watumull, J. (2017). The Universal Generative Faculty: The source of our expressive power in language, mathematics, morality, and music. *Journal of Neurolinguistics*, 43 Part B, 78–94.

Hay, J. F., Pelucchi, B., Graf Estes, K., & Saffran, J. R. (2011). Linking sounds to meanings: Infant statistical learning in a natural language. *Cognitive Psychology*, 63(2), 93–106.

Heckman, J. J., Moon, S. H., Pinto, R., Savelyev, P. A., & Yavitz, A. (2010). The rate of return to the HighScope Perry Preschool Program. *Journal of Public Economics*, 94(1), 114–128.

Heilbron, M., & Meyniel, F. (2019). Confidence resets reveal hierarchical adaptive learning in humans. *PLoS Computational Biology*, 15(4), e1006972. doi.org/10.1371/journal.pcbi.1006972.

Held, R., & Hein, A. (1963). Movement-produced stimulation in the development of visually guided behavior. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 56(5), 872–876.

Hensch, T. K. (2005). Critical period plasticity in local cortical circuits. *Nature Reviews Neuroscience*, 6(11), 877–888.

Hespos, S. J., & Baillargeon, R. (2008). Young infants' actions reveal their developing knowledge of support variables: Converging evidence for violation-of-expectation findings. *Cognition*, 107(1), 304–316.

Hinton, G. E., Dayan, P., Frey, B. J., & Neal, R. M. (1995). The «wake-sleep» algorithm for unsupervised neural networks. *Science*, 268(5214), 1158–1161.

Hinton, G. E., Osindero, S., & Teh, Y.-W. (2006). A fast learning algorithm for deep belief nets. *Neural Computation*, 18(7), 1527–1554.

Hiscock, H., Sciberras, E., Mensah, F., Gerner, B., Efron, D., Khano, S., & Oberklaid, F. (2015). Impact of a behavioural sleep intervention on symptoms and sleep in children with attention deficit hyperactivity disorder, and parental mental health: Randomised controlled trial. *BMJ (Clinical Research Ed.)*, 350, h68.

Hoefl, F., McCandliss, B. D., Black, J. M., Gantman, A., Zakerani, N., Hulme, C., Gabrieli, J. D. E. (2011). Neural systems predicting long-term outcome in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(1), 361–366.

Holtmaat, A., & Caroni, P. (2016). Functional and structural underpinnings of neuronal assembly formation in learning. *Nature Neuroscience*, 19(12), 1553–1562.

Horikawa, T., Tamaki, M., Miyawaki, Y., & Kamitani, Y. (2013). Neural decoding of visual imagery during sleep. *Science*, 340(6132), 639–642.

Houdé, O., Zago, L., Mellet, E., Moutier, S., Pineau, A., Mazoyer, B., & Tzourio-Mazoyer, N. (2000). Shifting from the perceptual brain to the logical brain: The neural impact of cognitive inhibition training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12(5), 721–728.

- Huber, R., Ghilardi, M. F., Massimini, M., & Tononi, G. (2004). Local sleep and learning. *Nature*, 430(6995), 78–81.
- Hurley, M. M., Dennett, D. C., & Adams, R. B. (2011). *Inside jokes: Using humor to reverse-engineer the mind*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Huttenlocher, P. R., & Dabholkar, A. S. (1997). Regional differences in synaptogenesis in human cerebral cortex. *Journal of Comparative Neurology*, 387(2), 167–178.
- Hutton, J. S., Horowitz-Kraus, T., Mendelsohn, A. L., DeWitt, T., Holland, S. K., & C-MIND Authorship Consortium. (2015). Home reading environment and brain activation in preschool children listening to stories. *Pediatrics*, 136(3), 466–478.
- Hutton, J. S., Phelan, K., Horowitz-Kraus, T., Dudley, J., Altaye, M., DeWitt, T., & Holland, S. K. (2017). Shared reading quality and brain activation during story listening in preschool-age children. *Journal of Pediatrics*, 191, 204–211.e1.
- Iriki, A. (2005). A prototype of *Homo faber*: A silent precursor of human intelligence in the tool-using monkey brain. // S. Dehaene, J.-R. Duhamel, M. D. Hauser, & G. Rizzolatti (Eds.), *From monkey brain to human brain* (pp. 253–271). Cambridge, MA: MIT Press.
- Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: A neural correlate. *Brain*, 124(9), 1701–1707.
- Isingrini, M., Perrotin, A., & Souchay, C. (2008). Aging, metamemory regulation and executive functioning. *Progress in Brain Research*, 169, 377–392.
- Iuculano, T. (2016). Neurocognitive accounts of developmental dyscalculia and its remediation. *Progress in Brain Research*, 227, 305–333.
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biology*, 6(2), 275–285.
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10382–10385.
- Jacob, S. N., & Nieder, A. (2009). Notation-independent representation of fractions in the human parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 29(14), 4652–4657.
- Jacoby, L. L., & Dallas, M. (1981). On the relationship between autobiographical memory and perceptual learning. *Journal of Experimental Psychology: General*, 110(3), 306–340.
- Jaeggi, S. M., Buschkuhl, M., Jonides, J., & Shah, P. (2011). Short- and long-term benefits of cognitive training. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(25), 10081–10086.
- James, C. E., Oechslin, M. S., Van De Ville, D., Hauert, C.-A., Descloux, C., & Lazeyras, F. (2014). Musical training intensity yields opposite effects on grey matter density in cognitive versus sensorimotor networks. *Brain Structure and Function*, 219(1), 353–366.
- Jaynes, E. T. (2003). *Probability theory: The logic of science*. Cambridge, MA: Cambridge University Press.
- Jenkins, J. G., & Dallenbach, K. M. (1924). Obliviscence during sleep and waking. *American Journal of Psychology*, 35(4), 605–612.
- Ji, D., & Wilson, M. A. (2007). Coordinated memory replay in the visual cortex and hippocampus during sleep. *Nature Neuroscience*, 10(1), 100–107.
- Jiang, X., Long, T., Cao, W., Li, J., Dehaene, S., & Wang, L. (2018). Production of supra-regular spatial sequences by macaque monkeys. *Current Biology*, 28(12), 1851–1859.
- Jiang, X., Shamie, I., Doyle, W. K., Friedman, D., Dugan, P., Devinsky, O., ... Halgren, E. (2017). Replay of large-scale spatio-temporal patterns from waking during subsequent NREM sleep in human cortex. *Scientific Reports*, 7, 17380.
- Jo, J., & Bengio, Y. (2017). Measuring the tendency of CNNs to learn surface statistical regularities. arxiv.org/abs/1711.11561.
- Johansson, F., Jirenhed, D.-A., Rasmussen, A., Zucca, R., & Hesslow, G. (2014). Memory trace and timing mechanism localized to cerebellar Purkinje cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(41), 14930–14934.

- Johnson, J. S., & Newport, E. L. (1989). Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cognitive Psychology*, 21(1), 60–99.
- Josselyn, S. A., Köhler, S., & Frankland, P. W. (2015). Finding the engram. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(9), 521–534.
- Kaminski, J., Call, J., & Fischer, J. (2004). Word learning in a domestic dog: Evidence for «fast mapping». *Science*, 304(5677), 1682–1683.
- Kang, M. J., Hsu, M., Krajbich, I. M., Loewenstein, G., McClure, S. M., Wang, J. T., & Camerer, C. F. (2009). The wick in the candle of learning: Epistemic curiosity activates reward circuitry and enhances memory. *Psychological Science*, 20(8), 963–973.
- Kang, S. H. K., Lindsey, R. V., Mozer, M. C., & Pashler, H. (2014). Retrieval practice over the long term: Should spacing be expanding or equal-interval? *Psychonomic Bulletin and Review*, 21(6), 1544–1550.
- Kanjlia, S., Lane, C., Feigenson, L., & Bedny, M. (2016). Absence of visual experience modifies the neural basis of numerical thinking. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(40), 11172–11177.
- Kano, T., Brockie, P. J., Sassa, T., Fujimoto, H., Kawahara, Y., Iino, Y., ... Maricq, A. V. (2008). Memory in *Caenorhabditis elegans* is mediated by NMDA-type ionotropic glutamate receptors. *Current Biology*, 18(13), 1010–1015.
- Kaplan, F., & Oudeyer, P.-Y. (2007). In search of the neural circuits of intrinsic motivation. *Frontiers in Neuroscience*, 1(1), 225–236.
- Kapur, S., Craik, F. I., Tulving, E., Wilson, A. A., Houle, S., & Brown, G. M. (1994). Neuroanatomical correlates of encoding in episodic memory: Levels of processing effect. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(6), 2008–2011.
- Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J., & Sagi, D. (1994). Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill. *Science*, 265(5172), 679–682.
- Karpicke, J. D., & Roediger, H. L. (2008). The critical importance of retrieval for learning. *Science*, 319(5865), 966–968.
- Kastner, S., & Ungerleider, L. G. (2000). Mechanisms of visual attention in the human cortex. *Annual Review of Neuroscience*, 23, 315–341.
- Keller, H. (1903). *The story of my life*. New York, NY: Doubleday, Page and Co.
- Kellman, P. J., & Spelke, E. S. (1983). Perception of partly occluded objects in infancy. *Cognitive Psychology*, 15(4), 483–524.
- Kemp, C., & Tenenbaum, J. B. (2008). The discovery of structural form. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(31), 10687–10692.
- Kidd, C., Piantadosi, S. T., & Aslin, R. N. (2012). The Goldilocks effect: Human infants allocate attention to visual sequences that are neither too simple nor too complex. *PLOS ONE*, 7(5), e36399.
- Kidd, C., Piantadosi, S. T., & Aslin, R. N. (2014). The Goldilocks effect in infant auditory attention. *Child Development*, 85(5), 1795–1804.
- Kilgard, M. P., & Merzenich, M. M. (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science*, 279(5357), 1714–1718.
- Kim, J. J., & Diamond, D. M. (2002). The stressed hippocampus, synaptic plasticity and lost memories. *Nature Reviews Neuroscience*, 3(6), 453–462.
- Kim, W. B., & Cho, J.-H. (2017). Encoding of discriminative fear memory by input-specific LTP in the amygdala. *Neuron*, 95(5), 1129–1146.
- Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75–86.
- Kirschner, P. A., & van Merriënboer, J. J. G. (2013). Do learners really know best? Urban legends in education. *Educational Psychologist*, 48(3), 169–183.

- Kitamura, T., Ogawa, S. K., Roy, D. S., Okuyama, T., Morrissey, M. D., Smith, L. M., Tonegawa, S. (2017). Engrams and circuits crucial for systems consolidation of a memory. *Science*, 356(6333), 73–78.
- Klingberg, T. (2010). Training and plasticity of working memory. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(7), 317–324.
- Knops, A., Thirion, B., Hubbard, E. M., Michel, V., & Dehaene, S. (2009). Recruitment of an area involved in eye movements during mental arithmetic. *Science*, 324(5934), 1583–1585.
- Knops, A., Viarouge, A., & Dehaene, S. (2009). Dynamic representations underlying symbolic and nonsymbolic calculation: Evidence from the operational momentum effect. *Attention, Perception, and Psychophysics*, 71(4), 803–821.
- Knudsen, E. I., & Knudsen, P. F. (1990). Sensitive and critical periods for visual calibration of sound localization by barn owls. *Journal of Neuroscience*, 10(1), 222–232.
- Knudsen, E. I., Zheng, W., & DeBello, W. M. (2000). Traces of learning in the auditory localization pathway. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(22), 11815–11820.
- Koechlin, E., Dehaene, S., & Mehler, J. (1997). Numerical transformations in five-month-old human infants. *Mathematical Cognition*, 3(2), 89–104.
- Koechlin, E., Ody, C., & Kouneiher, F. (2003). The architecture of cognitive control in the human prefrontal cortex. *Science*, 302(5648), 1181–1185.
- Koepp, M. J., Gunn, R. N., Lawrence, A. D., Cunningham, V. J., Dagher, A., Jones, T., ... Grasby, P. M. (1998). Evidence for striatal dopamine release during a video game. *Nature*, 393(6682), 266–268.
- Kolinsky, R., Morais, J., Content, A., & Cary, L. (1987). Finding parts within figures: A developmental study. *Perception*, 16(3), 399–407.
- Kolinsky, R., Verhaeghe, A., Fernandes, T., Mengarda, E. J., Grimm-Cabral, L., & Morais, J. (2011). Enantiomorphy through the looking glass: Literacy effects on mirror-image discrimination. *Journal of Experimental Psychology: General*, 140(2), 210–238.
- Kontra, C., Goldin-Meadow, S., & Beilock, S. L. (2012). Embodied learning across the life span. *Topics in Cognitive Science*, 4(4), 731–739.
- Kontra, C., Lyons, D. J., Fischer, S. M., & Beilock, S. L. (2015). Physical experience enhances science learning. *Psychological Science*, 26(6), 737–749.
- Kouider, S., Stahlhut, C., Gelskov, S. V., Barbosa, L. S., Dutat, M., de Gardelle, V., Dehaene-Lambertz, G. (2013). A neural marker of perceptual consciousness in infants. *Science*, 340(6130), 376–380.
- Krause, M. R., Zanos, T. P., Csorba, B. A., Pilly, P. K., Choe, J., Phillips, M. E., Pack, C. C. (2017). Transcranial direct current stimulation facilitates associative learning and alters functional connectivity in the primate brain. *Current Biology*, 27(20), 3086–3096.
- Kropff, E., & Treves, A. (2008). The emergence of grid cells: Intelligent design or just adaptation? *Hippocampus*, 18(12), 1256–1269.
- Krubitzer, L. (2007). The magnificent compromise: Cortical field evolution in mammals. *Neuron*, 56(2), 201–208.
- Kuhl, P. K., Tsao, F. M., & Liu, H. M. (2003). Foreign-language experience in infancy: Effects of short-term exposure and social interaction on phonetic learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(15), 9096–9101.
- Kurdiel, L., Duclos, K., & Spencer, R. M. C. (2013). Sleep spindles in midday naps enhance learning in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(43), 17267–17272.
- Kushnir, T., Xu, F., & Wellman, H. M. (2010). Young children use statistical sampling to infer the preferences of other people. *Psychological Science*, 21(8), 1134–1140.
- Kutas, M., & Federmeier, K. D. (2011). Thirty years and counting: Finding meaning in the N400 component of the event-related brain potential (ERP). *Annual Review of Psychology*, 62, 621–647.

- Kutas, M., & Hillyard, S. A. (1980). Reading senseless sentences: Brain potentials reflect semantic incongruity. *Science*, 207(4427), 203–205.
- Kutter, E. F., Bostroem, J., Elger, C. E., Mormann, F., & Nieder, A. (2018). Single neurons in the human brain encode numbers. *Neuron*, 100(3), 753–761.
- Kwan, K. Y., Lam, M. M. S., Johnson, M. B., Dube, U., Shim, S., Rašin, M.-R., Šestan, N. (2012). Species-dependent posttranscriptional regulation of NOS1 by FMRP in the developing cerebral cortex. *Cell*, 149(4), 899–911.
- Lake, B. M., Salakhutdinov, R., & Tenenbaum, J. B. (2015). Human-level concept learning through probabilistic program induction. *Science*, 350(6266), 1332–1338.
- Lake, B. M., Ullman, T. D., Tenenbaum, J. B., & Gershman, S. J. (2017). Building machines that learn and think like people. *Behavioral and Brain Sciences*, 40, e253.
- Landau, B., Gleitman, H., & Spelke, E. (1981). Spatial knowledge and geometric representation in a child blind from birth. *Science*, 213(4513), 1275–1278.
- Lane, C., Kanjlia, S., Omaki, A., & Bedny, M. (2015). «Visual» cortex of congenitally blind adults responds to syntactic movement. *Journal of Neuroscience*, 35(37), 12859–12868.
- Langston, R. F., Ainge, J. A., Couey, J. J., Canto, C. B., Bjerknes, T. L., Witter, M. P., ... Moser, M.-B. (2010). Development of the spatial representation system in the rat. *Science*, 328(5985), 1576–1580.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521(7553), 436–444.
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278–2324.
- Lefevre, J., & Mangin, J.-F. (2010). A reaction-diffusion model of human brain development. *PLOS Computational Biology*, 6(4), e1000749.
- Leong, Y. C., Radulescu, A., Daniel, R., DeWoskin, V., & Niv, Y. (2017). Dynamic interaction between reinforcement learning and attention in multidimensional environments. *Neuron*, 93(2), 451–463.
- Leppanen, P. H., Richardson, U., Pihko, E., Eklund, K. M., Guttorm, T. K., Aro, M., & Lyytinen, H. (2002). Brain responses to changes in speech sound durations differ between infants with and without familial risk for dyslexia. *Developmental Neuropsychology*, 22(1), 407–422.
- Lerner, Y., Honey, C. J., Silbert, L. J., & Hasson, U. (2011). Topographic mapping of a hierarchy of temporal receptive windows using a narrated story. *Journal of Neuroscience*, 31(8), 2906–2915.
- Leroy, F., Cai, Q., Bogart, S. L., Dubois, J., Coulon, O., Monzalvo, K., Dehaene-Lambertz, G. (2015). New human-specific brain landmark: The depth asymmetry of superior temporal sulcus. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(4), 1208–1213.
- Li, P., Legault, J., & Litcofsky, K. A. (2014). Neuroplasticity as a function of second language learning: Anatomical changes in the human brain. *Cortex*, 58, 301–324.
- Li, S., Lee, K., Zhao, J., Yang, Z., He, S., & Weng, X. (2013). Neural competition as a developmental process: Early hemispheric specialization for word processing delays specialization for face processing. *Neuropsychologia*, 51(5), 950–959.
- Lillard, A., & Else-Quest, N. (2006). Evaluating Montessori education. *Science*, 313(5795), 1893–1894.
- Lindsey, R. V., Shroyer, J. D., Pashler, H., & Mozer, M. C. (2014). Improving students' long-term knowledge retention through personalized review. *Psychological Science*, 25(3), 639–647.
- Lisman, J., Buzsáki, G., Eichenbaum, H., Nadel, L., Ranganath, C., & Redish, A. D. (2017). Viewpoints: How the hippocampus contributes to memory, navigation and cognition. *Nature Neuroscience*, 20(11), 1434–1447.
- Liu, S., Ullman, T. D., Tenenbaum, J. B., & Spelke, E. S. (2017). Ten-month-old infants infer the value of goals from the costs of actions. *Science*, 358(6366), 1038–1041.
- Livingstone, M. S., Vincent, J. L., Arcaro, M. J., Srihasam, K., Schade, P. F., & Savage, T. (2017). Development of the macaque face-patch system. *Nature Communications*, 8, 14897.

- Loewenstein, G. (1994). The psychology of curiosity: A review and reinterpretation. *Psychological Bulletin*, 116(1), 75–98.
- Lømo, T. (2018). Discovering long-term potentiation (LTP) – recollections and reflections on what came after. *Acta Physiologica*, 222(2), e12921.
- Louie, K., & Wilson, M. A. (2001). Temporally structured replay of awake hippocampal ensemble activity during rapid eye movement sleep. *Neuron*, 29(1), 145–156.
- Lyons, I. M., & Beilock, S. L. (2012). When math hurts: Math anxiety predicts pain network activation in anticipation of doing math. *PLOS ONE*, 7(10), e48076.
- Lyons, K. E., & Ghetti, S. (2011). The development of uncertainty monitoring in early childhood. *Child Development*, 82(6), 1778–1787.
- Lyytinen, H., Ahonen, T., Eklund, K., Guttorm, T., Kulju, P., Laakso, M. L., ... Viholainen, H. (2004). Early development of children at familial risk for dyslexia – follow-up from birth to school age. *Dyslexia*, 10(3), 146–178.
- Ma, L., & Xu, F. (2013). Preverbal infants infer intentional agents from the perception of regularity. *Developmental Psychology*, 49(7), 1330–1337.
- Mack, A., & Rock, I. (1998). *Inattention blindness*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(8), 4398–4403.
- Maguire, E. A., Spiers, H. J., Good, C. D., Hartley, T., Frackowiak, R. S., & Burgess, N. (2003). Navigation expertise and the human hippocampus: A structural brain imaging analysis. *Hippocampus*, 13(2), 250–259.
- Mahmoudzadeh, M., Dehaene-Lambertz, G., Fournier, M., Kongolo, G., Goudjil, S., Dubois, J., Wallois, F. (2013). Syllabic discrimination in premature human infants prior to complete formation of cortical layers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(12), 4846–4851.
- Mahon, B. Z., Anzellotti, S., Schwarzbach, J., Zampini, M., & Caramazza, A. (2009). Category-specific organization in the human brain does not require visual experience. *Neuron*, 63(3), 397–405.
- Maloney, E. A., & Beilock, S. L. (2012). Math anxiety: Who has it, why it develops, and how to guard against it. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(8), 404–406.
- Markman, E. M., & Wachtel, G. F. (1988). Children's use of mutual exclusivity to constrain the meanings of words. *Cognitive Psychology*, 20(2), 121–157.
- Markman, E. M., Wasow, J. L., & Hansen, M. B. (2003). Use of the mutual exclusivity assumption by young word learners. *Cognitive Psychology*, 47(3), 241–275.
- Marois, R., & Ivanoff, J. (2005). Capacity limits of information processing in the brain. *Trends in Cognitive Sciences*, 9(6), 296–305.
- Marques, J. F., & Dehaene, S. (2004). Developing intuition for prices in euros: Rescaling or relearning prices? *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 10(3), 148–155.
- Marshall, C. (2017). Montessori education: A review of the evidence base. *npj Science of Learning*, 2(1), 11.
- Marshall, L., Helgadóttir, H., Mölle, M., & Born, J. (2006). Boosting slow oscillations during sleep potentiates memory. *Nature*, 444(7119), 610–613.
- Marti, S., King, J.-R., & Dehaene, S. (2015). Time-resolved decoding of two processing chains during dual-task interference. *Neuron*, 88(6), 1297–1307.
- Marti, S., Sigman, M., & Dehaene, S. (2012). A shared cortical bottleneck underlying attentional blink and psychological refractory period. *NeuroImage*, 59(3), 2883–2898.
- Martin, S. L., Ramey, C. T., & Ramey, S. (1990). The prevention of intellectual impairment in children of impoverished families: Findings of a randomized trial of educational day care. *American Journal of Public Health*, 80(7), 844–847.
- Maye, J., Werker, J. F., & Gerken, L. (2002). Infant sensitivity to distributional information can affect phonetic discrimination. *Cognition*, 82(3), B101–B111.

- Mayer, R. E. (2004). Should there be a three-strikes rule against pure discovery learning? The case for guided methods of instruction. *American Psychologist*, 59(1), 14–19.
- McCandliss, B. D., Fiez, J. A., Protopapas, A., Conway, M., & McClelland, J. L. (2002). Success and failure in teaching the [r]-[l] contrast to Japanese adults: Tests of a Hebbian model of plasticity and stabilization in spoken language perception. *Cognitive, Affective, and Behavioral Neuroscience*, 2(2), 89–108.
- McCloskey, M., & Rapp, B. (2000). A visually based developmental reading deficit. *Journal of Memory and Language*, 43(2), 157–181.
- McCrink, K., & Wynn, K. (2004). Large-number addition and subtraction by 9-month-old infants. *Psychological Science*, 15(11), 776–781.
- Mehler, J., Jusczyk, P., Lambertz, G., Halsted, N., Bertoincini, J., & Amiel-Tison, C. (1988). A precursor of language acquisition in young infants. *Cognition*, 29(2), 143–178.
- Meyer, T., and Olson, C. R. (2011). Statistical learning of visual transitions in monkey inferotemporal cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(48), 19401–19406.
- Meyniel, F., & Dehaene, S. (2017). Brain networks for confidence weighting and hierarchical inference during probabilistic learning. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(19), E3859–E3868.
- Millum, J., & Emanuel, E. J. (2007). The ethics of international research with abandoned children. *Science*, 318(5858), 1874–1875.
- Mnih, V., Kavukcuoglu, K., Silve, D., Rusu, A. A., Veness, J., Bellemare, M. G., ... Hassabis, D. (2015). Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*, 518(7540), 529–533.
- Mongelli, V., Dehaene, S., Vinckier, F., Peretz, I., Bartolomeo, P., & Cohen, L. (2017). Music and words in the visual cortex: The impact of musical expertise. *Cortex*, 86, 260–274.
- Mongillo, G., Barak, O., & Tsodyks, M. (2008). Synaptic theory of working memory. *Science*, 319(5869), 1543–1546.
- Monzalvo, K., Fluss, J., Billard, C., Dehaene, S., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Cortical networks for vision and language in dyslexic and normal children of variable socio-economic status. *NeuroImage*, 61(1), 258–274.
- Morais, J. (2017). Literacy and democracy. *Language, Cognition and Neuroscience*, 33(3), 351–372.
- Morais, J., Bertelson, P., Cary, L., & Alegria, J. (1986). Literacy training and speech segmentation. *Cognition*, 24(1–2), 45–64.
- Morais, J., & Kolinsky, R. (2005). Literacy and cognitive change. // M. J. Snowling & C. Hulme (Eds.), *The science of reading: A handbook* (pp. 188–203). Oxford: Blackwell.
- Moreno, S., Bialystok, E., Barac, R., Schellenberg, E. G., Cepeda, N. J., & Chau, T. (2011). Short-term music training enhances verbal intelligence and executive function. *Psychological Science*, 22(11), 1425–1433.
- Morrison, C. M., & Ellis, A. W. (1995). Roles of word frequency and age of acquisition in word naming and lexical decision. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 21(1), 116–133.
- Morton, J., & Johnson, M. H. (1991). CONSPEC and CONLERN: A two-process theory of infant face recognition. *Psychological Review*, 98(2), 164–181.
- Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215(5109), 1519–1520.
- Muckli, L., Naumer, M. J., & Singer, W. (2009). Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(31), 13034–13039.
- Musso, M., Moro, A., Glauche, V., Rijntjes, M., Reichenbach, J., Buchel, C., & Weiller, C. (2003). Broca's area and the language instinct. *Nature Neuroscience*, 6(7), 774–781.
- Naatanen, R., Paavilainen, P., Rinne, T., & Alho, K. (2007). The mismatch negativity (MMN) in basic research of central auditory processing: A review. *Clinical Neurophysiology*, 118(12), 2544–2590.

- Nabokov, V. (1962). *Pale fire*. New York, NY: Putnam.
- National Institute of Child Health and Human Development. (2000). Report of the National Reading Panel: Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction (NIH publication no. 00-4769). Washington, DC: US Government Printing Office.
- Nau, M., Navarro Schröder, T., Bellmund, J. L. S., & Doeller, C. F. (2018). Hexadirectional coding of visual space in human entorhinal cortex. *Nature Neuroscience*, 21(2), 188–190.
- Nelson, C. A., Zeanah, C. H., Fox, N. A., Marshall, P. J., Smyke, A. T., & Guthrie, D. (2007). Cognitive recovery in socially deprived young children: The Bucharest Early Intervention Project. *Science*, 318(5858), 1937–1940.
- Nelson, M. J., El Karoui, I., Giber, K., Yang, X., Cohen, L., Koopman, H., ... Dehaene, S. (2017). Neurophysiological dynamics of phrase-structure building during sentence processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(18), E3669–E3678.
- Nemmi, F., Helander, E., Helenius, O., Almeida, R., Hassler, M., Räsänen, P., & Klingberg, T. (2016). Behavior and neuroimaging at baseline predict individual response to combined mathematical and working memory training in children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 20, 43–51.
- Ngo, H.-V. V., Martinetz, T., Born, J., & Mölle, M. (2013). Auditory closed-loop stimulation of the sleep slow oscillation enhances memory. *Neuron*, 78(3), 545–553.
- Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of number in the brain. *Annual Review of Neuroscience*, 32, 185–208.
- Niogi, S. N., & McCandliss, B. D. (2006). Left lateralized white matter microstructure accounts for individual differences in reading ability and disability. *Neuropsychologia*, 44(11), 2178–2188.
- Noble, K. G., Norman, M. F., & Farah, M. J. (2005). Neurocognitive correlates of socioeconomic status in kindergarten children. *Developmental Science*, 8(1), 74–87.
- Norimoto, H., Makino, K., Gao, M., Shikano, Y., Okamoto, K., Ishikawa, T., Ikegaya, Y. (2018). Hippocampal ripples down-regulate synapses. *Science*, 359(6383), 1524–1527.
- Obayashi, S., Suhara, T., Kawabe, K., Okauchi, T., Maeda, J., Akine, Y., Iriki, A. (2001). Functional brain mapping of monkey tool use. *NeuroImage*, 14(4), 853–861.
- Oechslin, M. S., Gschwind, M., & James, C. E. (2018). Tracking training-related plasticity by combining fMRI and DTI: The right hemisphere ventral stream mediates musical syntax processing. *Cerebral Cortex*, 28(4), 1209–1218.
- Olah, C., Mordvintsev, A., & Schubert, L. (2017). Feature visualization. *Distill*. doi.org/10.23915/distill.00007.
- Olesen, P. J., Westerberg, H., & Klingberg, T. (2004). Increased prefrontal and parietal activity after training of working memory. *Nature Neuroscience*, 7(1), 75–79.
- Orbán, G., Berkes, P., Fiser, J., & Lengyel, M. (2016). Neural variability and sampling-based probabilistic representations in the visual cortex. *Neuron*, 92(2), 530–543.
- Paller, K. A., McCarthy, G., & Wood, C. C. (1988). ERPs predictive of subsequent recall and recognition performance. *Biological Psychology*, 26(1–3), 269–276.
- Pallier, C., Dehaene, S., Poline, J.-B., Le Bihan, D., Argenti, A. M., Dupoux, E., & Mehler, J. (2003). Brain imaging of language plasticity in adopted adults: Can a second language replace the first? *Cerebral Cortex*, 13(2), 155–161.
- Pallier, C., Devauchelle, A. D., & Dehaene, S. (2011). Cortical representation of the constituent structure of sentences. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(6), 2522–2527.
- Palminteri, S., Kilford, E. J., Corice li, G., & Blakemore, S.-J. (2016). The computational development of reinforcement learning during adolescence. *PLOS Computational Biology*, 12(6), e1004953.
- Pashler, H., McDaniel, M., Rohrer, D., & Bjork, R. (2008). Learning styles: Concepts and evidence. *Psychological Science in the Public Interest*, 9(3), 105–119.

- Pegado, F., Comerlato, E., Ventura, F., Jobert, A., Nakamura, K., Buiatti, M., Dehaene, S. (2014). Timing the impact of literacy on visual processing. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(49), E5233–E5242.
- Pegado, F., Nakamura, K., Braga, L. W., Ventura, P., Nunes Filho, G., Pallier, C., Dehaene, S. (2014). Literacy breaks mirror invariance for visual stimuli: A behavioral study with adult illiterates. *Journal of Experimental Psychology: General*, 143(2), 887–894.
- Peigneux, P., Laureys, S., Fuchs, S., Collette, F., Perrin, F., Reggers, J., Maquet, P. (2004). Are spatial memories strengthened in the human hippocampus during slow wave sleep? *Neuron*, 44(3), 535–545.
- Pena, M., Werker, J. F., & Dehaene-Lambertz, G. (2012). Earlier speech exposure does not accelerate speech acquisition. *Journal of Neuroscience*, 32(33), 11159–11163.
- Penn, D. C., Holyoak, K. J., & Povinelli, D. J. (2008). Darwin's mistake: Explaining the discontinuity between human and nonhuman minds. *Behavioral and Brain Sciences*, 31(2), 109–130; discussion 130–178.
- Pessiglione, M., Seymour, B., Flandin, G., Dolan, R. J., & Frith, C. D. (2006). Dopamine-dependent prediction errors underpin reward-seeking behaviour in humans. *Nature*, 442(7106), 1042–1045.
- Piantadosi, S. T., Jara-Ettinger, J., & Gibson, E. (2014). Children's learning of number words in an indigenous farming-foraging group. *Developmental Science*, 17(4), 553–563.
- Piantadosi, S. T., Tenenbaum, J. B., & Goodman, N. D. (2012). Bootstrapping in a language of thought: A formal model of numerical concept learning. *Cognition*, 123(2), 199–217.
- Piantadosi, S. T., Tenenbaum, J. B., & Goodman, N. D. (2016). The logical primitives of thought: Empirical foundations for compositional cognitive models. *Psychological Review*, 123(4), 392–424.
- Piazza, M., De Feo, V., Panzeri, S., & Dehaene, S. (2018). Learning to focus on number. *Cognition*, 181, 35–45.
- Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116(1), 33–41.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44(3), 547–555.
- Piazza, M., Pica, P., Izard, V., Spelke, E. S., & Dehaene, S. (2013). Education enhances the acuity of the nonverbal approximate number system. *Psychological Science*, 24(6), 1037–1043.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, 306(5695), 499–503.
- Pierce, L. J., Klein, D., Chen, J.-K., Delcenserie, A., & Genesee, F. (2014). Mapping the unconscious maintenance of a lost first language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(48), 17314–17319.
- Pinheiro-Chagas, P., Dotan, D., Piazza, M., & Dehaene, S. (2017). Finger tracking reveals the covert stages of mental arithmetic. *Open Mind*, 1(1), 30–41.
- Pittenger, C., & Kandel, E. R. (2003). In search of general mechanisms for long-lasting plasticity: Aplysia and the hippocampus. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1432), 757–763.
- Poirel, N., Borst, G., Simon, G., Rossi, S., Cassotti, M., Pineau, A., & Houdé, O. (2012). Number conservation is related to children's prefrontal inhibitory control: An fMRI study of a Piagetian task. *PLOS ONE*, 7(7), e40802.
- Poo, M.-M., Pignatelli, M., Ryan, T. J., Tonegawa, S., Bonhoeffer, T., Martin, K. C., Stevens, C. (2016). What is memory? The present state of the engram. *BMC Biology*, 14, 40.
- Posner, M. I. (1994). Attention: The mechanisms of consciousness. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91(16), 7398–7403.

- Posner, M. I., & Rothbart, M. K. (1998). Attention, self-regulation and consciousness. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 353(1377), 1915–1927.
- Prado, E. L., & Dewey, K. G. (2014). Nutrition and brain development in early life. *Nutrition Reviews*, 72(4), 267–284.
- Prehn-Kristensen, A., Munz, M., Göder, R., Wilhelm, I., Korr, K., Vahl, W., Baving, L. (2014). Transcranial oscillatory direct current stimulation during sleep improves declarative memory consolidation in children with attention-deficit/hyperactivity disorder to a level comparable to healthy controls. *Brain Stimulation*, 7(6), 793–799.
- Qin, S., Cho, S., Chen, T., Rosenberg-Lee, M., Geary, D. C., & Menon, V. (2014). Hippocampal-neocortical functional reorganization underlies children's cognitive development. *Nature Neuroscience*, 17(9), 1263–1269.
- Quartz, S. R., & Sejnowski, T. J. (1997). The neural basis of cognitive development: A constructivist manifesto. *Behavioral and Brain Sciences*, 20(4), 537–556; 556–596.
- Rakic, P., Bourgeois, J. P., Eckenhoff, M. F., Zecevic, N., & Goldman-Rakic, P. S. (1986). Concurrent overproduction of synapses in diverse regions of the primate cerebral cortex. *Science*, 232(4747), 232–235.
- Ramanathan, D. S., Gulati, T., & Ganguly, K. (2015). Sleep-dependent reactivation of ensembles in motor cortex promotes skill consolidation. *PLOS Biology*, 13(9), e1002263.
- Ramirez, S., Liu, X., Lin, P.-A., Suh, J., Pignatelli, M., Redondo, R. L., ... Tonegawa, S. (2013). Creating a false memory in the hippocampus. *Science*, 341(6144), 387–391.
- Ramirez, S., Liu, X., MacDonald, C. J., Moffa, A., Zhou, J., Redondo, R. L., & Tonegawa, S. (2015). Activating positive memory engrams suppresses depression-like behaviour. *Nature*, 52(7556), 335–339.
- Rankin, C. H. (2004). Invertebrate learning: What can't a worm learn? *Current Biology*, 14(15), R617–R618.
- Rasch, B., Büchel, C., Gais, S., & Born, J. (2007). Odor cues during slow-wave sleep prompt declarative memory consolidation. *Science*, 315(5817), 1426–1429.
- Rasmussen, A., Jirenhed, D. A., & Hesslow, G. (2008). Simple and complex spike firing patterns in Purkinje cells during classical conditioning. *Cerebellum*, 7(4), 563–566.
- Rattan, A., Savani, K., Chugh, D., & Dweck, C. S. (2015). Leveraging mindsets to promote academic achievement: Policy recommendations. *Perspectives on Psychological Science*, 10(6), 721–726.
- Reich, L., Szwed, M., Cohen, L., & Amedi, A. (2011). A ventral visual stream reading center independent of visual experience. *Current Biology*, 21(5), 363–368.
- Reid, V. M., Dunn, K., Young, R. J., Amu, J., Donovan, T., & Reissland, N. (2017). The human fetus preferentially engages with face-like visual stimuli. *Current Biology*, 27(12), 1825–1828.
- Rescorla, R. A., & Wagner, A. R. (1972). A theory of Pavlovian conditioning: Variations in the effectiveness of reinforcement and nonreinforcement. // A. H. Black & W. F. Prokasy (Eds.), *Classical conditioning II: Current research and theory* (pp. 64–99). New York, NY: Appleton-Century-Crofts.
- Ribeiro, S., Goyal, V., Mello, C. V., & Pavlides, C. (1999). Brain gene expression during REM sleep depends on prior waking experience. *Learning and Memory*, 6(5), 500–508.
- Ritchie, S. J., & Tucker-Drob, E. M. (2018). How much does education improve intelligence? A meta-analysis. *Psychological Science*, 29(8), 1358–1369.
- Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A., & Menon, V. (2005). Developmental changes in mental arithmetic: Evidence for increased functional specialization in the left inferior parietal cortex. *Cerebral Cortex*, 15(11), 1779–1790.
- Robey, A. M., Dougherty, M. R., & Buttaccio, D. R. (2017). Making retrospective confidence judgments improves learners' ability to decide what not to study. *Psychological Science*, 28(11), 1683–1693.

- Roediger, H. L., & Karpicke, J. D. (2006). Test-enhanced learning: Taking memory tests improves long-term retention. *Psychological Science*, 17(3), 249–255.
- Rohrer, D., & Taylor, K. (2006). The effects of overlearning and distributed practise on the retention of mathematics knowledge. *Applied Cognitive Psychology*, 20(9), 1209–1224.
- Rohrer, D., & Taylor, K. (2007). The shuffling of mathematics problems improves learning. *Instructional Science*, 35(6), 481–498.
- Romeo, R. R., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Beyond the 30-million-word gap: Children’s conversational exposure is associated with language-related brain function. *Psychological Science*, 29(5), 700–710.
- Rouault, M., & Koechlin, E. (2018). Prefrontal function and cognitive control: From action to language. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 21, 106–111.
- Rudoy, J. D., Voss, J. L., Westerberg, C. E., & Paller, K. A. (2009). Strengthening individual memories by reactivating them during sleep. *Science*, 326(5956), 1079.
- Rueckl, J. G., Paz-Alonso, P. M., Molfese, P. J., Kuo, W.-J., Bick, A., Frost, S. J., Frost, R. (2015). Universal brain signature of proficient reading: Evidence from four contrasting languages. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(50), 15510–15515.
- Rueda, M. R., Rothbart, M. K., McCandliss, B. D., Saccomanno, L., & Posner, M. I. (2005). Training, maturation, and genetic influences on the development of executive attention. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(41), 14931–14936.
- Rugani, R., Fontanari, L., Simoni, E., Regolin, L., & Vallortigara, G. (2009). Arithmetic in newborn chicks. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276(1666), 2451–2460.
- Rugani, R., Vallortigara, G., Priftis, K., & Regolin, L. (2015). Number-space mapping in the newborn chick resembles humans’ mental number line. *Science*, 347(6221), 534–536.
- Sabbah, N., Authié, C. N., Sanda, N., Mohand-Saïd, S., Sahel, J.-A., Safran, A. B., Amedi, A. (2016). Increased functional connectivity between language and visually deprived areas in late and partial blindness. *NeuroImage*, 136, 162–173.
- Sackur, J., & Dehaene, S. (2009). The cognitive architecture for chaining of two mental operations. *Cognition*, 111(2), 187–211.
- Sadtler, P. T., Quick, K. M., Golub, M. D., Chase, S. M., Ryu, S. I., Tyler-Kabara, E. C., Batista, A. P. (2014). Neural constraints on learning. *Nature*, 512(7515), 423–426.
- Saffran, J. R., Aslin, R. N., & Newport, E. L. (1996). Statistical learning by 8-month-old infants. *Science*, 274(5294), 1926–1928.
- Sakai, T., Mikami, A., Tomonaga, M., Matsui, M., Suzuki, J., Hamada, Y., ... Matsuzawa, T. (2011). Differential prefrontal white matter development in chimpanzees and humans. *Current Biology*, 21(16), 1397–1402.
- Salimpoor, V. N., van den Bosch, I., Kovacevic, N., McIntosh, A. R., Dagher, A., & Zatorre, R. J. (2013). Interactions between the nucleus accumbens and auditory cortices predict music reward value. *Science*, 340(6129), 216–219.
- Samson, D. R., & Nunn, C. L. (2015). Sleep intensity and the evolution of human cognition. *Evolutionary Anthropology*, 24(6), 225–237.
- Sangrigoli, S., Pallier, C., Argenti, A.-M., Ventureyra, V. A. G., & de Schonen, S. (2005). Reversibility of the other-race effect in face recognition during childhood. *Psychological Science*, 16(6), 440–444.
- Saygin, Z. M., Norton, E. S., Osher, D. E., Beach, S. D., Cyr, A. B., Ozernov-Palchik, O., Gabrieli, J. D. E. (2013). Tracking the roots of reading ability: White matter volume and integrity correlate with phonological awareness in prereading and early-reading kindergarten children. *Journal of Neuroscience*, 33(33), 13251–13258.
- Saygin, Z. M., Osher, D. E., Koldewyn, K., Reynolds, G., Gabrieli, J. D., & Saxe, R. R. (2012). Anatomical connectivity patterns predict face selectivity in the fusiform gyrus. *Nature Neuroscience*, 15(2), 321–327.

- Saygin, Z. M., Osher, D. E., Norton, E. S., Youssofian, D. A., Beach, S. D., Feather, J., Kanwisher, N. (2016). Connectivity precedes function in the development of the visual word form area. *Nature Neuroscience*, 19(9), 1250–1255.
- Schapiro, A. C., Turk-Browne, N. B., Norman, K. A., & Botvinick, M. M. (2016). Statistical learning of temporal community structure in the hippocampus. *Hippocampus*, 26(1), 3–8.
- Schlaug, G., Jancke, L., Huang, Y., Staiger, J. F., & Steinmetz, H. (1995). Increased corpus callosum size in musicians. *Neuropsychologia*, 33(8), 1047–1055.
- Schmidt, R. A., & Bjork, R. A. (1992). New conceptualizations of practice: Common principles in three paradigms suggest new concepts for training. *Psychological Science*, 3(4), 207–217.
- Schoenemann, P. T., Sheehan, M. J., & Glotzer, L. D. (2005). Prefrontal white matter volume is disproportionately larger in humans than in other primates. *Nature Neuroscience*, 8(2), 242–252.
- Schultz, W., Dayan, P., & Montague, P. R. (1997). A neural substrate of prediction and reward. *Science*, 275(5306), 1593–1599.
- Schweinhart, L. J. (1993). Significant benefits: The High/Scope Perry Preschool study through age 27. Monographs of the High/Scope Educational Research Foundation, no. ten. Education Resources Information Center.
- Sederberg, P. B., Kahana, M. J., Howard, M. W., Donner, E. J., & Madsen, J. R. (2003). Theta and gamma oscillations during encoding predict subsequent recall. *Journal of Neuroscience*, 23(34), 10809–10814.
- Sederberg, P. B., Schulze-Bonhage, A., Madsen, J. R., Bromfield, E. B., McCarthy, D. C., Brandt, A., Kahana, M. J. (2006). Hippocampal and neocortical gamma oscillations predict memory formation in humans. *Cerebral Cortex*, 17(5), 1190–1196.
- Seehagen, S., Konrad, C., Herbert, J. S., & Schneider, S. (2015). Timely sleep facilitates declarative memory consolidation in infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(5), 1625–1629.
- Seitz, A., Lefebvre, C., Watanabe, T., & Jolicoeur, P. (2005). Requirement for high-level processing in subliminal learning. *Current Biology*, 15(18), R753–R755.
- Senghas, A., Kita, S., & Özyürek, A. (2004). Children creating core properties of language: Evidence from an emerging sign language in Nicaragua. *Science*, 305(5691), 1779–1782.
- Sergent, C., Baillet, S., & Dehaene, S. (2005). Timing of the brain events underlying access to consciousness during the attentional blink. *Nature Neuroscience*, 8(10), 1391–1400.
- Shah, P. E., Weeks, H. M., Richards, B., & Kaciroti, N. (2018). Early childhood curiosity and kindergarten reading and math academic achievement. *Pediatric Research*, 84(3), 380–386.
- Shatz, C. J. (1996). Emergence of order in visual system development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93(2), 602–608.
- Shaywitz, S. E., Escobar, M. D., Shaywitz, B. A., Fletcher, J. M., & Makuch, R. (1992). Evidence that dyslexia may represent the lower tail of a normal distribution of reading ability. *New England Journal of Medicine*, 326(3), 145–150.
- Sheese, B. E., Rothbart, M. K., Posner, M. I., White, L. K., & Fraundorf, S. H. (2008). Executive attention and self-regulation in infancy. *Infant Behavior and Development*, 31(3), 501–510.
- Sheridan, M. A., Fox, N. A., Zeanah, C. H., McLaughlin, K. A., & Nelson, C. A. (2012). Variation in neural development as a result of exposure to institutionalization early in childhood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(32), 12927–12932.
- Shi, R., & Lepage, M. (2008). The effect of functional morphemes on word segmentation in preverbal infants. *Developmental Science*, 11(3), 407–413.
- Shipston-Sharman, O., Solanka, L., & Nolan, M. F. (2016). Continuous attractor network models of grid cell firing based on excitatory–inhibitory interactions. *Journal of Physiology*, 594(22), 6547–6557.

- Shneidman, L. A., Arroyo, M. E., Levine, S. C., & Goldin-Meadow, S. (2013). What counts as effective input for word learning? *Journal of Child Language*, 40(3), 672–686.
- Shneidman, L. A., & Goldin-Meadow, S. (2012). Language input and acquisition in a Mayan village: How important is directed speech? *Developmental Science*, 15(5), 659–673.
- Shohamy, D., & Turk-Browne, N. B. (2013). Mechanisms for widespread hippocampal involvement in cognition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 142(4), 1159–1170.
- Siegler, R. S. (1989). Mechanisms of cognitive development. *Annual Review of Psychology*, 40, 353–379.
- Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The development of numerical estimation: Evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science*, 14(3), 237–243.
- Siegler, R. S., Thompson, C. A., & Schneider, M. (2011). An integrated theory of whole number and fractions development. *Cognitive Psychology*, 62(4), 273–296.
- Sigman, M., & Dehaene, S. (2008). Brain mechanisms of serial and parallel processing during dual-task performance. *Journal of Neuroscience*, 28(30), 7585–7598.
- Sigman, M., Pan, H., Yang, Y., Stern, E., Silbersweig, D., & Gilbert, C. D. (2005). Top-down reorganization of activity in the visual pathway after learning a shape identification task. *Neuron*, 46(5), 823–835.
- Silver, D., Huang, A., Maddison, C. J., Guez, A., Sifre, L., van den Driessche, G., Hassabis, D. (2016). Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*, 529(7587), 484–489.
- Simons, D. J., & Chabris, C. F. (1999). Gorillas in our midst: Sustained inattentive blindness for dynamic events. *Perception*, 28(9), 1059–1074.
- Sisk, V. F., Burgoyne, A. P., Sun, J., Butler, J. L., & Macnamara, B. N. (2018). To what extent and under which circumstances are growth mind-sets important to academic achievement? Two meta-analyses. *Psychological Science*, 29(4), 549–571.
- Skaggs, W. E., & McNaughton, B. L. (1996). Replay of neuronal firing sequences in rat hippocampus during sleep following spatial experience. *Science*, 271(5257), 1870–1873.
- Smaers, J. B., Gómez-Robles, A., Parks, A. N., & Sherwood, C. C. (2017). Exceptional evolutionary expansion of prefrontal cortex in great apes and humans. *Current Biology*, 27(5), 714–720.
- Spelke, E. S. (2003). What makes us smart? Core knowledge and natural language. // D. Gentner & S. Goldin-Meadow (Eds.), *Language in mind: Advances in the study of language and thought* (pp. 277–311). Cambridge, MA: MIT Press.
- Spencer, S. J., Steele, C. M., & Quinn, D. M. (1999). Stereotype threat and women's math performance. *Journal of Experimental Social Psychology*, 35(1), 4–28.
- Spencer-Smith, M., & Klingberg, T. (2015). Benefits of a working memory training program for inattention in daily life: A systematic review and meta-analysis. *PLOS ONE*, 10(3), e0119522.
- Srihasam, K., Mandeville, J. B., Morocz, I. A., Sullivan, K. J., & Livingstone, M. S. (2012). Behavioral and anatomical consequences of early versus late symbol training in macaques. *Neuron*, 73(3), 608–619.
- Stahl, A. E., & Feigenson, L. (2015). Observing the unexpected enhances infants' learning and exploration. *Science*, 348(6230), 91–94.
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, 210(4473), 1033–1035.
- Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 36(2), 97–127.
- Steele, C. M., & Aronson, J. (1995). Stereotype threat and the intellectual test performance of African Americans. *Journal of Personality and Social Psychology*, 69(5), 797–811.
- Steinhauer, K., & Drury, J. E. (2012). On the early left-anterior negativity (ELAN) in syntax studies. *Brain and Language*, 120(2), 135–162.
- Stickgold, R. (2005). Sleep-dependent memory consolidation. *Nature*, 437(7063), 1272–1278.

- Strauss, M., Sitt, J. D., King, J.-R., Elbaz, M., Azizi, L., Buiatti, M., Dehaene, S. (2015). Disruption of hierarchical predictive coding during sleep. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), E1353–E1362.
- Striem-Amit, E., & Amedi, A. (2014). Visual cortex extrastriate body-selective area activation in congenitally blind people «seeing» by using sounds. *Current Biology*, 24(6), 687–692.
- Strnad, L., Peelen, M. V., Bedny, M., & Caramazza, A. (2013). Multivoxel pattern analysis reveals auditory motion information in MT+ of both congenitally blind and sighted individuals. *PLOS ONE*, 8(4), e63198.
- Sun, T., Patoine, C., Abu-Khalil, A., Visvader, J., Sum, E., Cherry, T. J., Walsh, C. A. (2005). Early asymmetry of gene transcription in embryonic human left and right cerebral cortex. *Science*, 308(5729), 1794–1798.
- Sun, Z. Y., Klöppel, S., Rivière, D., Perrot, M., Frackowiak, R., Siebner, H., & Mangin, J.-F. (2012). The effect of handedness on the shape of the central sulcus. *NeuroImage*, 60(1), 332–339.
- Sur, M., Garraghty, P. E., & Roe, A. W. (1988). Experimentally induced visual projections into auditory thalamus and cortex. *Science*, 242(4884), 1437–1441.
- Sur, M., & Rubenstein, J. L. R. (2005). Patterning and plasticity of the cerebral cortex. *Science*, 310(5749), 805–810.
- Sutton, R. S., & Barto, A. G. (1998). *Reinforcement learning: An introduction*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Szpunar, K. K., Khan, N. Y., & Schacter, D. L. (2013). Interpolated memory tests reduce mind wandering and improve learning of online lectures. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(16), 6313–6317.
- Szwed, M., Dehaene, S., Kleinschmidt, A., Eger, E., Valabregue, R., Amadon, A., & Cohen, L. (2011). Specialization for written words over objects in the visual cortex. *NeuroImage*, 56(1), 330–344.
- Szwed, M., Qiao, E., Jobert, A., Dehaene, S., & Cohen, L. (2014). Effects of literacy in early visual and occipitotemporal areas of Chinese and French readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 26(3), 459–475.
- Szwed, M., Ventura, P., Querido, L., Cohen, L., & Dehaene, S. (2012). Reading acquisition enhances an early visual process of contour integration. *Developmental Science*, 15(1), 139–149.
- Takeuchi, T., Duzskiewicz, A. J., & Morris, R. G. M. (2014). The synaptic plasticity and memory hypothesis: Encoding, storage and persistence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1633), 20130288.
- Tenenbaum, J. B., Kemp, C., Griffiths, T. L., & Goodman, N. D. (2011). How to grow a mind: Statistics, structure, and abstraction. *Science*, 331(6022), 1279–1285.
- Terrace, H. S., Petitto, L. A., Sanders, R. J., & Bever, T. G. (1979). Can an ape create a sentence? *Science*, 206(4421), 891–902.
- Thiebaut de Schotten, M., Cohen, L., Amemiya, E., Braga, L. W., & Dehaene, S. (2014). Learning to read improves the structure of the arcuate fasciculus. *Cerebral Cortex*, 24(4), 989–995.
- Thornton, A., & McAuliffe, K. (2006). Teaching in wild meerkats. *Science*, 313(5784), 227–229.
- Todorovic, A., & de Lange, F. P. (2012). Repetition suppression and expectation suppression are dissociable in time in early auditory evoked fields. *Journal of Neuroscience*, 32(39), 13389–13395.
- Tombu, M., & Jolicoeur, P. (2004). Virtually no evidence for virtually perfect time-sharing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 30(5), 795–810.
- Uhrig, L., Dehaene, S., & Jarraya, B. (2014). A hierarchy of responses to auditory regularities in the macaque brain. *Journal of Neuroscience*, 34(4), 1127–1132.
- van Kerkoerle, T., Self, M. W., and Roelfsema, P. R. (2017). Layer-specificity in the effects of attention and working memory on activity in primary visual cortex. *Nature Communications*, 8, 13804.

- van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. H. (2000). Neural consequences of environmental enrichment. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(3), 191–198.
- van Vugt, B., Dagnino, B., Vartak, D., Safaai, H., Panzeri, S., Dehaene, S., & Roelfsema, P. R. (2018). The threshold for conscious report: Signal loss and response bias in visual and frontal cortex. *Science*, 360(6388), 537–542.
- Ventura, P., Fernandes, T., Cohen, L., Morais, J., Kolinsky, R., & Dehaene, S. (2013). Literacy acquisition reduces the influence of automatic holistic processing of faces and houses. *Neuroscience Letters*, 554, 105–109.
- Vinckier, F., Dehaene, S., Jobert, A., Dubus, J. P., Sigman, M., & Cohen, L. (2007). Hierarchical coding of letter strings in the ventral stream: Dissecting the inner organization of the visual word-form system. *Neuron*, 55(1), 143–156.
- Vinckier, F., Naccache, L., Papeix, C., Forget, J., Hahn-Barma, V., Dehaene, S., & Cohen, L. (2006). «What» and «where» in word reading: Ventral coding of written words revealed by parietal atrophy. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 18(12), 1998–2012.
- Viswanathan, P., & Nieder, A. (2013). Neuronal correlates of a visual «sense of number» in primate parietal and prefrontal cortices. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(27), 11187–11192.
- Viswanathan, P., & Nieder, A. (2015). Differential impact of behavioral relevance on quantity coding in primate frontal and parietal neurons. *Current Biology*, 25(10), 1259–1269.
- Vogel, E. K., & Machizawa, M. G. (2004). Neural activity predicts individual differences in visual working memory capacity. *Nature*, 428(6984), 748–751.
- Voss, M. W., Vivar, C., Kramer, A. F., & van Praag, H. (2013). Bridging animal and human models of exercise-induced brain plasticity. *Trends in Cognitive Sciences*, 17(10), 525–544.
- Wacongne, C., Labyt, E., van Wassenhove, V., Bekinschtein, T., Naccache, L., & Dehaene, S. (2011). Evidence for a hierarchy of predictions and prediction errors in human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(51), 20754–20759.
- Waelti, P., Dickinson, A., & Schultz, W. (2001). Dopamine responses comply with basic assumptions of formal learning theory. *Nature*, 412(6842), 43–48.
- Wagner, A. D., Schacter, D. L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A. M., Buckner, R. L. (1998). Building memories: Remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity. *Science*, 281(5380), 1188–1191.
- Wagner, U., Gais, S., Haider, H., Verleger, R., & Born, J. (2004). Sleep inspires insight. *Nature*, 427(6972), 352–355.
- Walker, M. P., Brakefield, T., Hobson, J. A., & Stickgold, R. (2003). Dissociable stages of human memory consolidation and reconsolidation. *Nature*, 425(6958), 616–620.
- Walker, M. P., & Stickgold, R. (2004). Sleep-dependent learning and memory consolidation. *Neuron*, 44(1), 121–133.
- Walker, M. P., Stickgold, R., Alsop, D., Gaab, N., & Schlaug, G. (2005). Sleep-dependent motor memory plasticity in the human brain. *Neuroscience*, 133(4), 911–917.
- Walker, S. P., Chang S. M., Powell, C. A., & Grantham-McGregor, S. M. (2005). Effects of early childhood psychosocial stimulation and nutritional supplementation on cognition and education in growth-stunted Jamaican children: Prospective cohort study. *Lancet*, 366(9499), 1804–1807.
- Wang, L., & Krauzlis, R. J. (2018). Visual selective attention in mice. *Current Biology*, 28(5), 676–685.
- Wang, L., Uhrig, L., Jarraya, B., & Dehaene, S. (2015). Representation of numerical and sequential patterns in macaque and human brains. *Current Biology*, 25(15), 1966–1974.
- Warneken, F., & Tomasello, M. (2006). Altruistic helping in human infants and young chimpanzees. *Science*, 311(5765), 1301–1303.
- Watanabe, T., Nanez, J. E., & Sasaki, Y. (2001). Perceptual learning without perception. *Nature*, 413(6858), 844–848.

- Weber-Fox, C. M., & Neville, H. J. (1996). Maturational constraints on functional specializations for language processing: ERP and behavioral evidence in bilingual speakers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 8(3), 231–256.
- Werker, J. F., & Hensch, T. K. (2014). Critical periods in speech perception: New directions. *Annual Review of Psychology*, 66, 173–196.
- Werker, J. F., & Tees, R. C. (1984). Cross-language speech perception: Evidence for perceptual reorganization during the first year of life. *Infant Behavior and Development*, 7(1), 49–63.
- Whitlock, J. R., Heynen, A. J., Shuler, M. G., & Bear, M. F. (2006). Learning induces long-term potentiation in the hippocampus. *Science*, 313(5790), 1093–1097.
- Widloski, J., & Fiete, I. R. (2014). A model of grid cell development through spatial exploration and spike time-dependent plasticity. *Neuron*, 83(2), 481–495.
- Wilhelm, I., Rose, M., Imhof, K. I., Rasch, B., Büchel, C., & Born, J. (2013). The sleeping child outplays the adult's capacity to convert implicit into explicit knowledge. *Nature Neuroscience*, 16(4), 391–393.
- Wills, T. J., Cacucci, F., Burgess, N., & O'Keefe, J. (2010). Development of the hippocampal cognitive map in preweanling rats. *Science*, 318(5985), 1573–1576.
- Wilson, M. A., & McNaughton, B. L. (1994). Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, 265(5172), 676–679.
- Windsor, J., Moraru, A., Nelson, C. A., Fox, N. A., & Zeanah, C. H. (2013). Effect of foster care on language learning at eight years: Findings from the Bucharest Early Intervention Project. *Journal of Child Language*, 40(3), 605–627.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749–750.
- Xu, F., & Garcia, V. (2008). Intuitive statistics by 8-month-old infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(13), 5012–5015.
- Xu, F., & Tenenbaum, J. B. (2007). Word learning as Bayesian inference. *Psychological Review*, 114(2), 245–272.
- Xu, K., Ba, J., Kiros, R., Cho, K., Courville, A., Salakhutdinov, R., Bengio, Y. (2015). Show, attend and tell: Neural image caption generation with visual attention. arxiv.org/abs/1502.03044.
- Yang, C. (2013). Ontogeny and phylogeny of language. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(16), 6324–6327.
- Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U., & McCandliss, B. D. (2010). Attentional focus during learning impacts N170 ERP responses to an artificial script. *Developmental Neuropsychology*, 35(4), 423–445.
- Yoon, J. M. D., Johnson, M. H., & Csibra, G. (2008). Communication-induced memory biases in preverbal infants. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(36), 13690–13695.
- Yoon, K., Buice, M. A., Barry, C., Hayman, R., Burgess, N., & Fiete, I. R. (2013). Specific evidence of low-dimensional continuous attractor dynamics in grid cells. *Nature Neuroscience*, 16(8), 1077–1084.
- Young, C. B., Wu, S. S., & Menon, V. (2012). The neurodevelopmental basis of math anxiety. *Psychological Science*, 23(5), 492–501.
- Zaromb, F. M., Karpicke, J. D., & Roediger, H. L. (2010). Comprehension as a basis for metacognitive judgments: Effects of effort after meaning on recall and metacognition. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 36(2), 552–557.
- Zaromb, F. M., & Roediger, H. L. I. (2010). The testing effect in free recall is associated with enhanced organizational processes. *Memory and Cognition*, 38(8), 995–1008.
- Zhu, X., Wang, F., Hu, H., Sun, X., Kilgard, M. P., Merzenich, M. M., & Zhou, X. (2014). Environmental acoustic enrichment promotes recovery from developmentally degraded auditory cortical processing. *Journal of Neuroscience*, 34(16), 5406–5415.
- Zoccolotti, P., De Luca, M., Di Pace, E., Gasperini, F., Judica, A., & Spinelli, D. (2005). Word length effect in early reading and in developmental dyslexia. *Brain and Language*, 93(3), 369–373.

Zylberberg, A., Dehaene, S., Roelfsema, P. R., & Sigman, M. (2011). The human Turing machine: A neural framework for mental programs. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(7), 293–300.

Перечень иллюстраций

ЦВЕТНАЯ ВСТАВКА

Иллюстрация 1: © Nicolás Sainz Trápaga.

Иллюстрация 2,верху: Google Brain Team. «Using Machine Learning to Explore Neural Network Architecture». *Google AI Blog* (2017). <https://ai.googleblog.com/2017/05/using-machine-learning-to-explore.html>.

Иллюстрация 2,внизу: Olah, Chris, Alexander Mordvintsev, & Ludwig Schubert. «Feature Visualization». *Distill* (2017). <https://distill.pub/2017/feature-visualization/>. Licensed under Creative Commons Attribution License CC-BY 4.0.

Иллюстрация 3,справа: Guerguiev, Jordan, Timothy P. Lillicrap, & Blake A. Richards. «Towards deep learning with segregated dendrites». *ELife*, 6, e22901, (2017). <https://elifesciences.org/articles/22901>.

Иллюстрация 3,слева: MNIST database of handwritten digits. LeCun, Yann, Corinna Cortes, & Christopher J. C. Burges. <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/>.

Иллюстрация 4: Kemp, Charles, & Joshua B. Tenenbaum. «The discovery of structural form». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(31), 10687–10692 (2008). <https://www.pnas.org/content/105/31/10687.short>. © 2008 by National Academy of Sciences, U.S.A.

Иллюстрация 5,вверху слева: Fei Xu Lab.

Иллюстрация 5,вверху справа: Moira Dillon & Elizabeth Spelke.

Иллюстрация 6,вверху: G. Dehaene-Lambertz & J. Dubois.

Иллюстрация 6,внизу: перерисована на основании данных, опубликованных в статье: Dehaene-Lambertz, Ghislaine, Lucie Hertz-Pannier, Jessica Dubois, Sébastien Mériaux, Alexis Roche, Mariano Sigman, & Stanislas Dehaene. «Functional organization of perisylvian activation during presentation of sentences in preverbal infants». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(38), 14240–14245, (2006). <https://www.pnas.org/content/103/38/14240>. © 2006 by National Academy of Sciences, U.S.A.

Иллюстрация 7: воспроизведена в измененном виде с разрешения Леи Крубитцер. Обзор соответствующего исследования см. Krubitzer, Leah. «The Magnificent Compromise: Cortical Field Evolution in Mammals». *Neuron*, 56(2), 201–208, (2007).

Иллюстрация 8,вверху: воспроизведена в измененном виде с разрешения Алена Шедотала. См. Belle, Morgane, David Godefroy, Gérard Couly, Samuel A. Malone, Francis Collier, Paolo Giacobini, & Alain Chédotal. «Tridimensional Visualization and Analysis of Early Human Development». *Cell*, vol. 169(1), 161–173.e12, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.cell.2017.03.008>.

Иллюстрация 8,внизу: G. Dehaene-Lambertz & J. Dubois.

Иллюстрация 9: Amunts, Katrin, Marianne Lenzen, Angela D. Friederici, Axel Schleicher, Patricia Morosan, Nicola Palomero-Gallagher, & Karl Zilles. «Broca's Region: Novel Organizational Principles and Multiple Receptor Mapping». *PLoS Biology*, 8(9). e1000489, (2010). <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.1000489>.

Иллюстрация 10,вверху справа: David Hablützel (Pexels).

Иллюстрация 10,внизу: перепечатана с разрешения Springer Nature. *Nature*. Hafting, Torkel, Marianne Fyhn, Sturla Molden, May Britt Moser, & Edvard I. Moser. «Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex». © 2005.

Иллюстрация 10,вверху слева и в центре: © Stanislas Dehaene.

Иллюстрация 11: Muckli, Lars, Marcus J. Naumer, & Wolf Singer. «Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(31), 13034–13039, (2009). <https://www.pnas.org/content/106/31/13034>.

Иллюстрация 12: Amalric, Marie, & Stanislas Dehaene. «Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 113 (18) 4909-4917, (2016). <https://www.pnas.org/content/early/2016/04/06/1603205113>. (Воспроизведена частично.)

Иллюстрация 13, внизу: Amalric, Marie, Isabelle Denghien, & Stanislas Dehaene. «On the role of visual experience in mathematical development: Evidence from blind mathematicians». *Developmental Cognitive Neuroscience*, vol. 30 pg. 314-323 (2018). <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878929316302201?via%3Dihub>. (Воспроизведена частично.)

Иллюстрация 14: создана автором на основе данных, опубликованных в статье: Dehaene, Stanislas, Felipe Pegado, Lucia W. Braga, Paulo Ventura, Gilberto Nunes Filho, Antonette Jobert, Ghislaine Dehaene-Lambertz, Régine Kolinsky, José Morais, & Laurent Cohen. «How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language». *Science*, vol. 330, issue 6009, pg. 1359–1364, (2010). <https://science.sciencemag.org/content/330/6009/1359>.

Иллюстрация 15, вверху: G. Dehaene-Lambertz.

Иллюстрация 15, внизу: создана автором на основе еще не опубликованных данных, а также данных, приведенных в статье: Monzalvo, Karla, Joel Fluss, Catherine Billard, Stanislas Dehaene, & Ghislaine Dehaene-Lambertz. «Cortical networks for vision and language in dyslexic and normal children of variable socio-economic status». *Neuroimage*, vol. 61(1), pg. 258–274, (2012). <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.02.035>.

Иллюстрация 16, вверху: Bruce Blaus, Blausen.com staff. «Medical gallery of Blausen Medical 2014». *WikiJournal of Medicine* 1 (2), (2014). doi: 10.15347/wjm/2014.010. (Воспроизведена частично.)

Иллюстрация 16, внизу: Kilgard, Michael P., & Michael M. Merzenich. «Cortical Map Reorganization Enabled by Nucleus Basalis Activity». *Science*, vol. 279, issue 5357, (1998), pg. 1714–8. Reprinted with permission from AAAS.

Иллюстрация 17: создана автором на основе данных, опубликованных в статьях: Bekinschtein, Tristan A., Stanislas Dehaene, Benjamin Rohaut, François Tadel, Laurent Cohen, & Lionel Naccache. «Neural signature of the conscious processing of auditory regularities». *Proceedings from the National Academy of Sciences U.S.A.*, vol. 106(5), pg. 1672–1677, (2009). <https://doi.org/10.1073/pnas.0809667106>; и Strauss, Melanie, Jacobo D. Sitt, Jean-Remi King, Maxime Elbaz, Leila Azizi, Marco Buiatti, Lionel Naccache, Virginia van Wassenhove, & Stanislas Dehaene. «Disruption of hierarchical predictive coding during sleep». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 112(11), E1353-1362, (2015). <https://doi.org/10.1073/pnas.1501026112>.

Иллюстрация 18, слева: Dehaene-Lambertz, Ghislaine, Karla Monzalvo, & Stanislas Dehaene. «The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition». *PLoS Biology*, 16(3), e2004103, (2018). <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.2004103>. (Воспроизведена частично.)

Иллюстрация 18, справа: перерисована из статьи: Zoccolotti, Pierluigi, Maria De Luca, Enrico Di Pace, Filippo Gasperini, Anna Judica, & Donatella Spinelli. «Word length effect in early reading and in developmental dyslexia». *Brain and Language*, vol. 93(3), pg. 369–373, (2005). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0093934X04002792?via%3Dihub>.

Иллюстрация 19: перерисована автором из статьи: Chen, Zhe, & Matthew A. Wilson. «Deciphering Neural Codes of Memory during Sleep». *Trends in Neurosciences*, vol. 40(5), pg. 260–275, (2017). <https://doi.org/10.1016/j.tins.2017.03.005>.

ЧЕРНО-БЕЛЫЕ ИЛЛЮСТРАЦИИ В ТЕКСТЕ

Рисунок 1 на стр. 35, внизу: © Stanislas Dehaene.

Рисунок 2 на стр. 68: Tenenbaum, Joshua B., Charles Kemp, Thomas L. Griffiths, & Noah D. Goodman. «How to Grow a Mind: Statistics, Structure, and Abstraction». *Science*, vol. 331(6022), pg. 1279–1285, (2011). <https://science.sciencemag.org/content/331/6022/1279>.

Рисунок 3 на стр. 84: © Stanislas Dehaene.

Рисунок 4 на стр. 113, слева: Cajal y Ramón, Santiago. «The Croonian Lecture: La Fine Structure des Centres Nerveux». *Proceedings of the Royal Society of London* (1894). <https://archive.org/details/philtrans09891650/page/n17>. (Воспроизведен частично.)

Рисунок 4 на стр. 113, вверху справа: Philip Buttery.

Рисунок 4 на стр. 113, внизу справа: © Stanislas Dehaene.

Рисунок 5 на стр. 132: *The Postnatal Development of the Human Cerebral Cortex*, Vol. I-VIII. Jesse LeRoy Conel, Cambridge, Mass.: Harvard University Press. © 1939, 1941, 1947, 1951, 1955, 1959, 1963, 1967, President and Fellows of Harvard College. Обновлено: 1967, 1969, 1975, 1979, 1983, 1987, 1991.

Рисунок 6 на стр. 137, вверху: перерисовано на основе данных, опубликованных в статьях: Flege, James E., Murray J. Munro, & Ian R. A. MacKay. «Factors affecting strength of perceived foreign accent in a second language». *Journal of the Acoustical Society of America*, 97(5), 3125–3134 (1995); Johnson, J. S., & E.L. Newport. «Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language». *Cognitive Psychology*, 21(1), 60–99, (1989) <https://psycnet.apa.org/record/1989-18581-001>; Hartshorne, J. K., J. B. Tenenbaum, & S. Pinker. «A critical period for second language acquisition: Evidence from 2/3 million English speakers». *Cognition*, 177, 263–277, (2018). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29729947>.

Рисунок 6 на стр. 137, внизу: Pierce, Lara J., Denise Klein, Jen-Kai Chen, Audrey Delcenserie, & Fred Genesee. «Mapping the unconscious maintenance of a lost first language». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 111(48), pg. 17314–17319, (2014). <https://www.pnas.org/content/111/48/17314>. (Воспроизведен частично.)

Рисунок 7 на стр. 142, вверху: Eric Knudsen.

Рисунок 7 на стр. 142, внизу: Knudsen, Eric I., Weimin Zheng, and William M. DeBello. «Traces of learning in the auditory localization pathway». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 97(22), pg. 11815–11820, (2000). <https://www.pnas.org/content/97/22/11815>. © 2000 by the National Academy of Sciences, U.S.A.

Рисунок 8 на стр. 146, вверху: © 2001, Michael Carroll.

Рисунок 8 на стр. 146, внизу: Almas, Alisa N., Kathryn A. Degnan, Anca Radulescu, Charles A. Nelson III, Charles H. Zeanah, & Nathan A. Fox. «Effects of early intervention and the moderating effects of brain activity on institutionalized children's social skills at age 8». *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 109 Suppl 2, pg. 17228–17231, (2012). https://www.pnas.org/content/109/Supplement_2/17228. (Воспроизведен частично.)

Рисунок 9 на стр. 164: создан автором на основе данных, опубликованных в статье: Dehaene, Stanislas, Felipe Pegado, Lucia W. Braga, Paulo Ventura, Gilberto Nunes Filho, Antoinette Jobert, Ghislaine Dehaene-Lambertz, Régine Kolinsky, José Morais, & Laurent Cohen. «How Learning to Read Changes the Cortical Networks for Vision and Language». *Science*, vol. 330(6009), pg. 1359–1364, (2010). <https://doi.org/10.1126/science.1194140>.

Рисунок 10 на стр. 166: Dehaene-Lambertz, Ghislaine, Karla Monzalvo, & Stanislas Dehaene (2018). «The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition». *PLoS Biology*, vol. 16(3), e2004103, (2018). <https://journals.plos.org/plosbiology/article?id=10.1371/journal.pbio.2004103>. (Воспроизведен частично.)

Рисунок 11 на стр. 179: Xu, Kelvin, Jimmy Ba, Ryan Kiros, Kyunghyun Cho, Aaron Courville, Ruslan Salakhutdinov, Richard Zemel, & Yoshua Bengio. «Show, Attend and Tell: Neural Image Caption Generation with Visual Attention». ArXiv:1502.03044 [Cs], (2015). [Http://arxiv.org/abs/1502.03044](http://arxiv.org/abs/1502.03044).

Рисунок 12 на стр. 188: создан автором на основе графиков, любезно составленных Брюсом Мекэндлиссом по данным: Yoncheva, Y. N., Blau, V. C., Maurer, U., & McCandliss, B. D. «Attentional Focus During Learning Impacts N170 ERP Responses to an Artificial Script». *Developmental Neuropsychology*, 35(4), 423–445 (2010). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4365954/>.

Рисунок 13 на стр. 197, вверху: © Stanislas Dehaene.

Рисунок 13 на стр. 197, внизу: воспроизведен частично с разрешения Роберта Заторре, на основе данных, опубликованных в статье: Bermudez, Patrick, Jason P. Lerch, Alan C. Evans, & Robert J. Zatorre. «Neuroanatomical Correlates of Musicianship as Revealed by Cortical Thickness and Voxel-Based Morphometry». *Cereb Cortex*, vol. 19(7), pg. 1583–1596, (2009). <https://academic.oup.com/cercor/article/19/7/1583/317010>.

Рисунок 14 на стр. 202, вверху: составлен авторами на основе фотографий, любезно предоставленных Дьердем Гергели. Данные: Egyed, Katalin, Ildikó Király, & György Gergely. «Communicating Shared Knowledge in Infancy». *Psychological Science*, vol. 24(7), pg. 1348–1353, (2013). <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0956797612471952>.

Рисунок 14 на стр. 202, внизу: составлен по данным: Gergely, György, Harold Bekkering, & Ildikó Király. «Rational imitation in preverbal infants». *Nature*, vol. 415(6873), pg. 755 (2002). <https://www.nature.com/articles/415755a>.

Рисунок 15 на стр. 223: Kaplan, Frederic, & Pierre-Yves Oudeyer. «In Search of the Neural Circuits of Intrinsic Motivation». *Frontiers in Neuroscience*, 1(1), 225, (2007). <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/neuro.01.1.1.017.2007/full>. © 2007, Kaplan & Oudeyer. (Воспроизведен частично.)

Рисунок 16 на стр. 248: © Stanislas Dehaene.

Примечания

Введение

1 См. фильмы «Сотворившая чудо» (1962) и «Мари Эртен» (2014), а также следующие книги: Arnould, 1900; Keller, 1903.

2 Научение у нематоды *C. elegans*: Bessa, Maciel, & Rodrigues, 2013; Kano et al., 2008; Rankin, 2004.

3 Веб-сайт британского фонда Education Endowment Foundation (EEF): educationendowmentfoundation.org.uk.

4 Мозг постоянно отслеживает неопределенность: Meyniel & Dehaene, 2017; Heilbron & Meyniel, 2019.

Глава 1. Семь определений научения

5 Вы можете провести этот эксперимент на выставке C3RV34U, которую я организовал в Городке науки, главном научном музее Парижа.

6 Искусственная нейронная сеть *LeNet*: LeCun, Bottou, Bengio, & Haffner, 1998.

7 Визуализация иерархии скрытых узлов в искусственной нейронной сети *GoogLeNet*: Olah, Mordvintsev, & Schubert, 2017.

8 Поэтапное распознавание десяти цифр глубокой нейронной сетью: Guerguiev, Lillicrap, & Richards, 2017.

9 Обучение с подкреплением: Mnih et al., 2015; Sutton & Barto, 1998.

10 Искусственная нейронная сеть, которая учится играть в видеоигры *Atari*: Mnih et al., 2015.

11 Искусственная нейронная сеть, которая учится играть в го: Banino et al., 2018; Silver et al., 2016.

12 Состязательное обучение: Goodfellow et al., 2014.

13 Сверточные нейронные сети: LeCun, Bengio, & Hinton, 2015; LeCun et al., 1998.

14 Алгоритм дарвиновского естественного отбора: Dennett, 1996.

Глава 2. Почему наш мозг учится лучше, чем существующие машины

15 Искусственные нейронные сети преимущественно имитируют бессознательные операции мозга: Dehaene, Lau, & Kouider, 2017.

16 Искусственные нейронные сети, как правило, схватывают поверхностные закономерности: Jo & Bengio, 2017.

17 Генерирование образов, которые приводят в замешательство как людей, так и искусственные нейронные сети: Elsayed et al., 2018.

18 Искусственные нейронные сети, которые учатся распознавать капчи: George et al., 2017.

19 Критика скорости обучения искусственных нейронных сетей: Lake, Ullman, Tenenbaum, & Gershman, 2017.

20 Отсутствие систематичности в искусственных нейронных сетях: Fodor & Pylyshyn, 1988; Fodor & McLaughlin, 1990.

21 Гипотеза о языке мышления: Amalric, Wang, et al., 2017; Fodor, 1975.

22 Научение счету как вывод программы: Piantadosi, Tenenbaum, & Goodman, 2012; также см. Piantadosi, Tenenbaum, & Goodman, 2016.

23 Рекурсивные репрезентации как уникальная особенность нашего вида: Dehaene, Meyniel, Wacongne, Wang, & Pallier, 2015; Everaert, Huybregts, Chomsky, Berwick, & Bolhuis, 2015; Hauser, Chomsky, & Fitch, 2002; Hauser & Watumull, 2017.

24 Особенности кодирования элементарной последовательности звуков у людей: Wang, Uhrig, Jarraya, & Dehaene, 2015.

25 Усвоение геометрических правил – медленное у обезьян и супербыстрое у детей: Jiang et al., 2018.

26 Сознательно мыслящий человеческий мозг напоминает однопоточную машину Тьюринга: Sackur & Dehaene, 2009; Zylberberg, Dehaene, Roelfsema, & Sigman, 2011.

27 Быстрое усвоение значений новых слов: Tenenbaum, Kemp, Griffiths, & Goodman, 2011; Xu & Tenenbaum, 2007.

28 Усвоение новых слов на базе совместного внимания: Baldwin et al., 1996.

29 Знание детерминативов и других служебных слов в 12 месяцев: Cyr & Shi, 2013; Shi & Lepage, 2008.

30 Принцип взаимного исключения в усвоении новых слов: Carey & Bartlett, 1978; Clark, 1988; Markman & Wachtel, 1988; Markman, Wasow, & Hansen, 2003.

31 Более редкое применение принципа взаимного исключения у билингвов: Byers-Heinlein & Werker, 2009.

32 Рико – собака, знавшая сотни слов: Kaminski, Call, & Fischer, 2004.

33 Моделирование «искусственного ученого»: Kemp & Tenenbaum, 2008.

34 Открытие принципа причинности: Goodman, Ullman, & Tenenbaum, 2011; Tenenbaum et al., 2011.

35 Мозг как генеративная модель: Lake, Salakhutdinov, & Tenenbaum, 2015; Lake et al., 2017.

36 Теория вероятностей – логика науки: Jaynes, 2003.

37 Байесовский метод обработки информации в коре головного мозга: Friston, 2005. Эмпирические данные касательно иерархической передачи сигналов вероятностной ошибки в коре см., например, Chao, Takaura, Wang, Fujii, & Dehaene, 2018; Wacongne et al., 2011.

Глава 3. Невидимые знания младенцев

38 Представления младенцев о физических объектах: Baillargeon & DeVos, 1991; Kellman & Spelke, 1983.

39 Быстрое понимание того, почему предметы падают: Baillargeon, Needham, & DeVos, 1992; Hespos & Baillargeon, 2008.

40 Представления младенцев о количестве: Izard, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2008; Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009; Starkey & Cooper, 1980; Starkey, Spelke, & Gelman, 1990. Подробный обзор этих и других исследований приведен во втором издании моей книги *The Number Sense* (Dehaene, 2011).

41 Мультимодальные представления о количестве у новорожденных: Izard et al., 2009.

42 Способность младенцев складывать и вычитать малые числа: Koechlin, Dehaene, & Mehler, 1997; Wynn, 1992.

43 Способность младенцев складывать и вычитать большие числа: McCrink & Wynn, 2004.

44 Развитие чувства числа с возрастом: Halberda & Feigenson, 2008; Piazza et al., 2010; Piazza, Pica, Izard, Spelke, & Dehaene, 2013.

45 Чувство числа у цыплят: Rugani, Fontanari, Simoni, Regolin, & Vallortigara, 2009; Rugani, Vallortigara, Priftis, & Regolin, 2015.

- 46 Числовые нейроны у необученных животных: Ditz & Nieder, 2015; Viswanathan & Nieder, 2013.
- 47 Числовые нейроны у человека: Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2004; Kutter, Bostroem, Elger, Mormann, & Nieder, 2018.
- 48 Базовые знания младенцев: Spelke, 2003.
- 49 Байесовские умозаключения у младенцев: Xu & Garcia, 2008.
- 50 Ребенок как «ученый в колыбели»: Gopnik, Meltzoff, & Kuhl, 1999; Gopnik et al., 2004.
- 51 Понимание вероятностей и случайности у младенцев: Denison & Xu, 2010; Gweon, Tenenbaum, & Schulz, 2010; Kushnir, Xu, & Wellman, 2010.
- 52 Способность различать, кто достает шары из контейнера – человек или машина: Ma & Xu, 2013.
- 53 Логическое мышление у 12-месячных детей: Cesana-Arlotti et al., 2018.
- 54 Понимание намерений у младенцев: Gergely, Bekkering, & Király, 2002; Gergely & Csibra, 2003; также см. Warneken & Tomasello, 2006.
- 55 Логические умозаключения о предпочтениях других людей у 10-месячных детей: Liu, Ullman, Tenenbaum, & Spelke, 2017.
- 56 Оценка действий других людей: Buon et al., 2014.
- 57 Способность различать намеренные и случайные действия: Behne, Carpenter, Call, & Tomasello, 2005.
- 58 Обработка лиц в период внутриутробного развития: Reid et al., 2017.
- 59 Распознавание лиц в младенчестве и развитие коркового ответа на лица: Adibpour, Dubois, & Dehaene-Lambertz, 2018; Deen et al., 2017; Livingstone et al., 2017.
- 60 Распознавание лиц в первый год жизни: Morton & Johnson, 1991.
- 61 Предпочтение родного языка: Mehler et al., 1988.
- 62 «...взыграл младенец радостно во чреве моем»: Евангелие от Луки, 1:44.
- 63 См. мою книгу «Сознание и мозг» (2014).
- 64 Латерализация обработки речи и голоса у недоношенных детей: Mahmoudzadeh et al., 2013.
- 65 Членение высказывания на слова у младенцев: Nay, Pelucchi, Graf Estes, & Saffran, 2011; Saffran, Aslin, & Newport, 1996.
- 66 Способность маленьких детей обнаруживать нарушения грамматических правил: Bernal, Dehaene-Lambertz, Millotte, & Christophe, 2010.
- 67 Попытки обучить животных языку: см., например, Penn, Holyoak, & Povinelli, 2008; Terrace, Petitto, Sanders, & Bever, 1979; Yang, 2013.
- 68 Быстрое возникновение языка в сообществах глухих людей: Senghas, Kita, & Özyürek, 2004.

Глава 4. Рождение мозга

- 69 Нейровизуализация структур мозга, связанных с речью, у младенцев: Dehaene-Lambertz et al., 2006; Dehaene-Lambertz, Dehaene, & Hertz-Pannier, 2002.
- 70 Эмпиризм в представлениях о мозге младенцев: см., например, Elman et al., 1996; Quartz & Sejnowski, 1997.
- 71 Эволюция коры головного мозга (цветная иллюстрация 7): Krubitzer, 2007.
- 72 Иерархия корковых ответов на речь: Lerner, Honey, Silbert, & Hasson, 2011; Pallier, Devauchelle, & Dehaene, 2011.
- 73 Организация основных корковых проводящих путей при рождении: Dehaene-Lambertz & Spelke, 2015; Dubois et al., 2015.

- 74 Гипотеза дезорганизованного мозга, получающего импринт окружающей среды: Quartz & Sejnowski, 1997.
- 75 Организация периферийной нервной системы в первые два месяца внутриутробного развития: Belle et al., 2017.
- 76 Поля Бродмана: Amunts et al., 2010; Amunts & Zilles, 2015; Brodmann, 1909.
- 77 Экспрессия генов в разных участках коры головного мозга: Kwan et al., 2012; Sun et al., 2005.
- 78 Первые признаки асимметрии мозга: Dubois et al., 2009; Leroy et al., 2015.
- 79 Асимметрия мозга у правой и левой: Sun et al., 2012.
- 80 Самоорганизующаяся модель складок коры: Lefevre & Mangin, 2010.
- 81 Нейроны решетки у крысы: Vanino et al., 2018; Brun et al., 2008; Fyhn, Molden, Witter, Moser, & Moser, 2004; Hafting, Fyhn, Molden, Moser, & Moser, 2005.
- 82 Самоорганизующиеся модели нейронов решетки: Kropff & Treves, 2008; Shipston-Sharman, Solanka, & Nolan, 2016; Widloski & Fiete, 2014; Yoon et al., 2013.
- 83 Быстрое появление нейронов решетки, нейронов места и нейронов направления головы во время развития: Langston et al., 2010; Wills, Cacucci, Burgess, & O'Keefe, 2010.
- 84 Нейроны решетки у человека: Doeller, Barry, & Burgess, 2010; Nau, Navarro Schröder, Bellmund, & Doeller, 2018.
- 85 Ориентация в пространстве у ребенка, слепого от рождения: Landau, Gleitman, & Spelke, 1981.
- 86 Быстрое появление областей, отвечающих за распознавание лиц: Deen et al., 2017; Livingstone et al., 2017.
- 87 Реакция теменной коры на количество предметов: Nieder & Dehaene, 2009.
- 88 Самоорганизующаяся модель числовых нейронов: Hannagan, Nieder, Viswanathan, & Dehaene, 2017.
- 89 Самоорганизация, основанная на внутреннем «игровом движении в голове»: Lake et al., 2017.
- 90 Гены и нейрональная миграция в развитии дислексии: Galaburda, LoTurco, Ramus, Fitch, & Rosen, 2006.
- 91 Аномалии коннективности при дислексии: Darki, Peyrard-Janvid, Matsson, Kere, & Klingberg, 2012; Hoeft et al., 2011; Niogi & McCandliss, 2006.
- 92 Фонологические предикторы дислексии у шестимесячных детей: Leppanen et al., 2002; Lyytinen et al., 2004.
- 93 Дефицит внимания при дислексии: Friedmann, Kerbel, & Shvimer, 2010.
- 94 Зрительная дислексия с зеркальными ошибками: McCloskey & Rapp, 2000.
- 95 Колоколообразная кривая (кривая нормального распределения) для дислексии: Shaywitz, Escobar, Shaywitz, Fletcher, & Makuch, 1992.
- 96 Когнитивные и неврологические нарушения при дискалькулии: Butterworth, 2010; Iuculano, 2016.
- 97 Сниженный объем серого вещества у преждевременно рожденных детей с дискалькулией: Isaacs, Edmonds, Lucas, & Gadian, 2001.

Глава 5. Роль окружающей среды

- 98 Гипотезы синаптической пластичности: Holtmaat & Caroni, 2016; Takeuchi, Duzskiewicz, & Morris, 2014.
- 99 Музыка активирует систему вознаграждения: Salimpoor et al., 2013.
- 100 Долговременная потенция: Bliss & Lomo, 1973; Lomo, 2018.

- 101 Аплизия, гиппокамп и синаптическая пластичность: Pittenger & Kandel, 2003.
- 102 Гиппокамп и пространственная память: Whitlock, Heynen, Shuler, & Bear, 2006.
- 103 Запоминание пугающих звуков у мышей: Kim & Cho, 2017.
- 104 Каузальная роль изменений в синапсах: Takeuchi et al., 2014.
- 105 Природа энграммы, нейронного базиса памяти: Josselyn, Köhler, & Frankland, 2015; Poo et al., 2016.
- 106 Рабочая память и устойчивое срабатывание нейронов: Courtney, Ungerleider, Keil, & Haxby, 1997; Ester, Sprague, & Serences, 2015; Goldman-Rakic, 1995; Kerkoerle, Self, & Roelfsema, 2017; Vogel & Machizawa, 2004.
- 107 Рабочая память и быстрые изменения в синапсах: Mongillo, Barak, & Tsodyks, 2008.
- 108 Роль гиппокампа в быстром усвоении новой информации: Genzel et al., 2017; Lisman et al., 2017; Schapiro, Turk-Browne, Norman, & Botvinick, 2016; Shohamy & Turk-Browne, 2013.
- 109 Смещение энграммы из гиппокампа в кору: Kitamura et al., 2017.
- 110 Создание ложных воспоминаний у мышей: Ramirez et al., 2013.
- 111 Превращение плохого воспоминания в хорошее: Ramirez et al., 2015.
- 112 Стирание травматического воспоминания: Kim & Cho, 2017.
- 113 Создание новых воспоминаний во время сна: de Lavilléon et al., 2015.
- 114 Овладение инструментами и символами у макак: Iriki, 2005; Obayashi et al., 2001; Srihasam, Mandeville, Morocz, Sullivan, & Livingstone, 2012.
- 115 Изменения в отдаленных синапсах: Fitzsimonds, Song, & Poo, 1997.
- 116 Анатомические изменения, обусловленные занятиями музыкой: Gaser & Schlaug, 2003; Oechslin, Gschwind, & James, 2018; Schlaug, Jancke, Huang, Staiger, & Steinmetz, 1995.
- 117 Анатомические изменения, обусловленные умением читать и писать: Carreiras et al., 2009; Thiebaut de Schotten, Cohen, Amemiya, Braga, & Dehaene, 2014.
- 118 Анатомические изменения после научения жонглированию: Draganski et al., 2004; Gerber et al., 2014.
- 119 Изменения в мозге лондонских таксистов: Maguire et al., 2000, 2003.
- 120 Несинаптический механизм памяти в мозжечке: Johansson, Jirenhed, Rasmussen, Zucca, & Hesslow, 2014; Rasmussen, Jirenhed, & Hesslow, 2008.
- 121 Влияние физических упражнений и питания на мозг: Prado & Dewey, 2014; Voss, Vivar, Kramer, & van Praag, 2013.
- 122 Нарушения познавательных способностей у детей при недостатке витамина В₁ (тиамина): Fattal, Friedmann, & Fattal-Valevski, 2011.
- 123 Пластичность мозга у ребенка, родившегося без правого полушария: Muckli, Naumer, & Singer, 2009.
- 124 Превращение слуховой коры в зрительную: Sur, Garraghty, & Roe, 1988; Sur & Rubenstein, 2005.
- 125 Гипотеза дезорганизованного мозга, получающего импринт окружающей среды: Quartz & Sejnowski, 1997.
- 126 Самоорганизация зрительных карт за счет ретинальных волн: Goodman & Shatz, 1993; Shatz, 1996.
- 127 Прогрессивное приспособление самопроизвольной активности коры: Berkes, Orbán, Lengyel, & Fiser, 2011; Orbán, Berkes, Fiser, & Lengyel, 2016.
- 128 Обзор концепции сензитивных периодов: Werker & Hensch, 2014.
- 129 Рост корковых нейронов у человека: Conel, 1939; Courchesne et al., 2007.
- 130 Избыточное образование и элиминация синапсов в ходе развития: Rakic, Bourgeois, Eckenhoff, Zecevic, & Goldman-Rakic, 1986.

- 131 Отдельные фазы элиминации синапсов у людей: Huttenlocher & Dabholkar, 1997.
- 132 Прогрессивная миелинизация корковых волокон: Dubois et al., 2007, 2015; Flechsig, 1876.
- 133 Ускорение зрительных ответов у маленьких детей: Adibpour et al., 2018; Dehaene-Lambertz & Spelke, 2015.
- 134 Замедленность сознательной обработки у маленьких детей: Kouider et al., 2013.
- 135 Сензитивный период для бинокулярного зрения: Epelbaum, Milleret, Buisseret, & Duffer, 1993; Fawcett, Wang, & Birch, 2005; Hensch, 2005.
- 136 Утрата способности различать фонемы неродного языка: Dehaene-Lambertz & Spelke, 2015; Maye, Werker, & Gerken, 2002; Pena, Werker, & Dehaene-Lambertz, 2012; Werker & Tees, 1984.
- 137 Частичное восстановление способности различать [p] и [л] у японцев: McCandliss, Fiez, Protapas, Conway, & McClelland, 2002.
- 138 Анатомия слуховой коры – предиктор способности к овладению фонетическими контрастами иностранного языка: Golestani, Molko, Dehaene, Le Bihan, & Pallier, 2007.
- 139 Сензитивный период для овладения вторым языком: Flege, Munro, & MacKay, 1995; Hartshorne, Tenenbaum, & Pinker, 2018; Johnson & Newport, 1989; Weber-Fox & Neville, 1996.
- 140 Резкое снижение скорости освоения грамматики второго языка около 17 лет (анализ данных нескольких миллионов людей): Hartshorne et al., 2018.
- 141 Сензитивный период для овладения языком у глухих людей с кохлеарным имплантатом: Friedmann & Rusou, 2015.
- 142 Биологические механизмы открытия и закрытия сензитивных периодов: Caroni, Donato, & Muller, 2012; Friedmann & Rusou, 2015; Werker & Hensch, 2014.
- 143 Восстановление нейропластичности: Krause et al., 2017.
- 144 Реорганизация речевых областей у приемных детей: Pallier et al., 2003. Аналогичные результаты были получены и в области распознавания лиц: корейские приемные дети, переехавшие в западную страну до девяти лет, теряли изначальное преимущество в распознавании представителей своей расы (Sangrigoli, Pallier, Argenti, Ventureyra, & de Schonen, 2005).
- 145 Спящий след первого языка у усыновленных детей: Pierce, Klein, Chen, Delcenserie, & Genesee, 2014.
- 146 Спящие связи у сов: Knudsen & Knudsen, 1990; Knudsen, Zheng, & DeBello, 2000.
- 147 Влияние возраста усвоения слов на их обработку: Ellis & Lambon Ralph, 2000; Gerhand & Barry, 1999; Morrison & Ellis, 1995.
- 148 *Bucharest Early Intervention Project*: Almas et al., 2012; Berens & Nelson, 2015; Nelson et al., 2007; Sheridan, Fox, Zeanah, McLaughlin, & Nelson, 2012; Windsor, Moraru, Nelson, Fox, & Zeanah, 2013.
- 149 Этика Бухарестского проекта: Millum & Emanuel, 2007.

Глава 6. Нейронный рециклинг

- 150 Nabokov, 1962.
- 151 Трудности с распознаванием картинок у неграмотных людей: Kolinsky et al., 2011; Kolinsky, Morais, Content, & Cary, 1987; Szwed, Ventura, Querido, Cohen, & Dehaene, 2012.
- 152 Трудности с обработкой зеркальных изображений у неграмотных людей: Kolinsky et al., 2011, 1987; Pegado, Nakamura, et al., 2014.
- 153 Неспособность неграмотных людей обращать внимание на часть лица: Ventura et al., 2013.
- 154 Трудности с распознаванием и запоминанием произнесенных слов у неграмотных людей: Castro-Caldas, Petersson, Reis, Stone-Elander, & Ingvar, 1998; Morais, 2017; Morais,

Bertelson, Cary, & Alegria, 1986; Morais & Kolinsky, 2005.

155 Влияние обучения арифметике: Dehaene, Izard, Pica, & Spelke, 2006; Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008; Piazza et al., 2013; Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004.

156 Счет и арифметика у амазонских индейцев: пирахан: Frank, Everett, Fedorenko, & Gibson, 2008; мундуруку: Pica et al., 2004; цимане: Piantadosi, Jara-Ettinger, & Gibson, 2014.

157 Освоение понятия числовой прямой: Dehaene, 2003; Dehaene et al., 2008; Siegler & Opfer, 2003.

158 Гипотеза нейронного рециклинга: Dehaene, 2005, 2014; Dehaene & Cohen, 2007.

159 Эволюция посредством дублирования нервных связей: Chakraborty & Jarvis, 2015; Fukuchi-Shimogori & Grove, 2001.

160 Научение, ограниченное нейрональным подпространством: Galgali & Mante, 2018; Golub et al., 2018; Sadtler et al., 2014.

161 Одномерное кодирование в теменной доле: Chafee, 2013; Fitzgerald et al., 2013.

162 Роль теменной доли в сравнении социального статуса: Chiao, 2010.

163 Двумерное кодирование в энторинальной коре: Yoon et al., 2013.

164 Кодирование произвольного двумерного пространства нейронами решетки: Constantinescu, O'Reilly, & Behrens, 2016.

165 Кодирование синтаксических деревьев в зоне Брока: Musso et al., 2003; Nelson et al., 2017; Pallier et al., 2011.

166 Чувство числа: Dehaene, 2011.

167 Числовые нейроны у необученных животных: Ditz & Nieder, 2015; Viswanathan & Nieder, 2013.

168 Влияние тренировки на числовые нейроны: Viswanathan & Nieder, 2015.

169 Усвоение арабских цифр у обезьян: Diester & Nieder, 2007.

170 Связь между сложением, вычитанием и пространственным вниманием: Knops, Thirion, Hubbard, Michel, & Dehaene, 2009; Knops, Viarouge, & Dehaene, 2009.

171 фМРТ мозга профессиональных математиков: Amalric & Dehaene, 2016, 2017.

172 Нейровизуализационные исследования обработки чисел у маленьких детей: Izard et al., 2008.

173 фМРТ мозга дошкольников: Cantlon, Brannon, Carter, & Pelphrey, 2006. Другое исследование (Cantlon & Li, 2013) показало, что области коры, отвечающие за речь и числа, активны уже в 4-летнем возрасте, когда ребенок смотрит соответствующие разделы выпусков *Sesame Street*, и что их активность является надежным предиктором речевых и математических навыков.

174 Слепые математики: Amalric, Denghien, & Dehaene, 2017.

175 Перепрофилирование затылочной коры на занятия математикой у слепых людей: Amalric, Denghien, et al., 2017; Kanjlia, Lane, Feigenson, & Bedny, 2016.

176 Обработка речи в затылочной коре у слепых людей: Amedi, Raz, Pianka, Malach, & Zohary, 2003; Bedny, Pascual-Leone, Dodel-Feder, Fedorenko, & Saxe, 2011; Lane, Kanjlia, Omaki, & Bedny, 2015; Sabbah et al., 2016.

177 Дискуссия о пластичности коры у слепых людей: Bedny, 2017; Hannagan, Amedi, Cohen, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2015.

178 Ретинотопические карты у слепых людей: Bock et al., 2015.

179 Рециклинг зрительной коры у слепых людей: Abboud, Maidenbaum, Dehaene, & Amedi, 2015; Amedi et al., 2003; Bedny et al., 2011; Mahon, Anzellotti, Schwarzbach, Zampini, & Caramazza, 2009; Reich, Szwed, Cohen, & Amedi, 2011; Striem-Amit & Amedi, 2014; Strnad, Peelen, Bedny, & Caramazza, 2013.

180 Коннективность – предиктор функции зрительной коры: Bouhali et al., 2014; Hannagan et al., 2015; Saygin et al., 2012, 2013, 2016.

- 181 Эффект расстояния при сравнении чисел: Dehaene, 2007; Dehaene, Dupoux, & Mehler, 1990; Moyer & Landauer, 1967.
- 182 Эффект расстояния в задачах типа «X и Y – разные числа или одинаковые?»: Dehaene & Akhavein, 1995; Diester & Nieder, 2010.
- 183 Эффект расстояния при проверке примеров на сложение и вычитание: Groen & Parkman, 1972; Pinheiro-Chagas, Dotan, Piazza, & Dehaene, 2017.
- 184 Ментальная репрезентация цен: Dehaene & Marques, 2002; Marques & Dehaene, 2004.
- 185 Метальная репрезентация четности: Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993; отрицательных чисел: Blair, Rosenberg-Lee, Tsang, Schwartz, & Menon, 2012; Fischer, 2003; Gullick & Wolford, 2013; дробей: Jacob & Nieder, 2009; Siegler, Thompson, & Schneider, 2011.
- 186 Язык мышления в математике: Amalric, Wang, et al., 2017; Piantadosi et al., 2012, 2016.
- 187 См. мою книгу Reading in the Brain: Dehaene, 2009.
- 188 Механизмы инвариантного распознавания письменных слов: Dehaene et al., 2001, 2004.
- 189 Связи между областью зрительной формы слова и речевыми центрами: Bouhali et al., 2014; Saygin et al., 2016.
- 190 Нейровизуализационные исследования мозга неграмотных людей: Dehaene et al., 2010; Dehaene, Cohen, Morais, & Kolinsky, 2015; Pegado, Comerlato, et al., 2014.
- 191 Чтение как специализация первичных зрительных зон: Chang et al., 2015; Dehaene et al., 2010; Szwed, Qiao, Jobert, Dehaene, & Cohen, 2014.
- 192 Конкуренция между чтением и обработкой лиц в левом полушарии: Dehaene et al., 2010; Pegado, Comerlato, et al., 2014.
- 193 Развитие навыка чтения и распознавание лиц: Dehaene-Lambertz, Monzalvo, & Dehaene, 2018; Dundas, Plaut, & Behrmann, 2013; Li et al., 2013; Monzalvo, Fluss, Billard, Dehaene, & Dehaene-Lambertz, 2012.
- 194 Сниженная реакция на слова и лица у детей с дислексией: Monzalvo et al., 2012.
- 195 Универсальный маркер трудностей в овладении чтением: Rueckl et al., 2015.
- 196 Конкуренция между словами и лицами – нокаут или блокировка? Dehaene-Lambertz et al., 2018.
- 197 Овладение чтением во взрослом возрасте: Braga et al., 2017; Cohen, Dehaene, McCormick, Durant, & Zanker, 2016.
- 198 Смещение области зрительной формы слова у музыкантов: Mongelli et al., 2017.
- 199 Сниженная реакция на лица у математиков: Amalric & Dehaene, 2016.
- 200 Длительные эффекты раннего обучения: см. программы *Abecedarian* (Campbell et al., 2012, 2014; Martin, Ramey, & Ramey, 1990), *Perry preschool program* (Heckman, Moon, Pinto, Savellyev, & Yavitz, 2010; Schweinhart, 1993), *Jamaican Study* (Gertler et al., 2014; Grantham-McGregor, Powell, Walker, & Himes, 1991; Walker, Chang, Powell, & Grantham-McGregor, 2005).
- 201 Речь, ориентированная на ребенка, и расширение словарного запаса: Shneidman, Arroyo, Levine, & Goldin-Meadow, 2013; Shneidman & Goldin-Meadow, 2012.
- 202 Повышенная реакция на речь у детей, которым родители читают вслух: Hutton et al., 2015, 2017; также см. Romeo et al., 2018.
- 203 Преимущества раннего билингвизма: Bialystok, Craik, Green, & Gollan, 2009; Costa & Sebastián-Gallés, 2014; Li, Legault, & Litcofsky, 2014.
- 204 Положительная роль обогащенной среды: Donato, Rompani, & Caroni, 2013; Knudsen et al., 2000; van Praag, Kempermann, & Gage, 2000; Voss et al., 2013; Zhu et al., 2014.

- 205 Внимание у мышей: Wang & Krauzlis, 2018.
- 206 Внимание в искусственных нейронных сетях: Bahdanau, Cho, & Bengio, 2014; Cho, Courville, & Bengio, 2015.
- 207 Внимание в искусственной нейронной сети, которая учится называть картинки: Xu et al., 2015.
- 208 Невнимание препятствует научению: Ahissar & Hochstein, 1993.
- 209 Минимальное научение в отсутствие внимания и осознания: Seitz, Lefebvre, Watanabe, & Jolicoeur, 2005; Watanabe, Nanez, & Sasaki, 2001.
- 210 Активность нейронов префронтальной коры и доступ к сознанию: Dehaene & Changeux, 2011; van Vugt et al., 2018.
- 211 Ацетилхолин, дофамин, нейропластичность и перестройка кортикальных карт: Bao, Chan, & Merzenich, 2001; Froemke, Merzenich, & Schreiner, 2007; Kilgard & Merzenich, 1998.
- 212 Баланс между торможением и возбуждением в его связи с восстановлением нейропластичности: Werker & Hensch, 2014.
- 213 Видеоигры и активация систем сигнализации и вознаграждения: Коерп et al., 1998.
- 214 Положительное влияние видеоигр: Bavelier et al., 2011; Cardoso-Leite & Bavelier, 2014; Green & Bavelier, 2003.
- 215 Когнитивный тренинг с использованием видеоигр: наши программы обучения математике см. www.thenumberrace.com и www.thenumbercatcher.com; овладение навыком чтения см. grapholearn.fr.
- 216 Пространственное внимание: Posner, 1994.
- 217 Усиление сигналов за счет внимания: Çukur, Nishimoto, Huth, & Gallant, 2013; Desimone & Duncan, 1995; Kastner & Ungerleider, 2000.
- 218 Слепота невнимания (перцептивная слепота): Mack & Rock, 1998; Simons & Chabris, 1999.
- 219 Эффект мигания внимания: Marois & Ivanoff, 2005; Sergent, Baillet, & Dehaene, 2005.
- 220 Элементы, оставленные без внимания, обеспечивают минимальное научение: Leong, Radulescu, Daniel, DeWoskin, & Niv, 2017.
- 221 Эксперимент, посвященный вниманию к буквам в сравнении с вниманием к целым словам: Yoncheva, Blau, Maurer, & McCandiss, 2010.
- 222 Сравнительные педагогические исследования фонетического метода и метода целых слов в обучении чтению: Castles, Rastle, & Nation, 2018; Ehri, Nunes, Stahl, & Willows, 2001; National Institute of Child Health and Human Development, 2000; также см. Dehaene, 2009.
- 223 Организация управляющего контроля в префронтальной коре: D'Esposito & Grossman, 1996; Koechlin, Ody, & Kouneiher, 2003; Rouault & Koechlin, 2018.
- 224 Экспансия префронтальной коры у человека: Elston, 2003; Sakai et al., 2011; Schoenemann, Sheehan, & Glotzer, 2005; Smaers, Gómez-Robles, Parks, & Sherwood, 2017.
- 225 Префронтальная иерархия и метакогнитивный контроль: Fleming, Weil, Nagy, Dolan, & Rees, 2010; Koechlin et al., 2003; Rouault & Koechlin, 2018.
- 226 Нейрональное глобальное рабочее пространство: Dehaene & Changeux, 2011; Dehaene, Changeux, Naccache, Sackur, & Sergent, 2006; Dehaene, Kerszberg, & Changeux, 1998; Dehaene & Naccache, 2001.
- 227 Центральное узкое место: Chun & Marois, 2002; Marti, King, & Dehaene, 2015; Marti, Sigman, & Dehaene, 2012; Sigman & Dehaene, 2008.
- 228 Неосознаваемая задержка при выполнении сдвоенных задач: Corallo, Sackur, Dehaene, & Sigman, 2008; Marti et al., 2012.
- 229 Дискуссии о способности расщеплять внимание и выполнять две задачи параллельно: Tombu & Jolicoeur, 2004.

230 Чрезмерное количество украшений на стенах класса отвлекает учеников: Fisher, Godwin, & Seltman, 2014.

231 Использование электронных устройств в классе пагубно сказывается на результатах экзаменов: Glass & Kang, 2018.

232 Ошибка «А, не Б» и развитие префронтальной коры: Diamond & Doar, 1989; Diamond & Goldman-Rakic, 1989.

233 Развитие управляющего контроля и восприятия количества: Borst, Poirel, Pineau, Cassotti, & Houdé, 2013; Piazza, De Feo, Panzeri, & Dehaene, 2018; Poirel et al., 2012.

234 Задачи на определение количества и их влияние на префронтальную кору: Viswanathan & Nieder, 2015.

235 Роль управляющего контроля в когнитивном и эмоциональном развитии: Houdé et al., 2000; Isingrini, Perrotin, & Souchay, 2008; Posner & Rothbart, 1998; Sheese, Rothbart, Posner, White, & Fraundorf, 2008; Siegler, 1989.

236 Влияние тренировки на исполнительный контроль и рабочую память: Diamond & Lee, 2011; Habibi, Damasio, Ipari, Elliott Sachs, & Damasio, 2018; Jaeggi, Buschkuhl, Jonides, & Shah, 2011; Klingberg, 2010; Moreno et al., 2011; Olesen, Westerberg, & Klingberg, 2004; Rueda, Rothbart, McClellis, Saccomanno, & Posner, 2005.

237 Рандомизированные исследования педагогики Монтессори: Lillard & Else-Quest, 2006; Marshall, 2017.

238 Занятия музыкой и их влияние на мозг: Bermudez, Lerch, Evans, & Zatorre, 2009; James et al., 2014; Moreno et al., 2011.

239 Связь между исполнительным контролем, префронтальной корой и интеллектом: Duncan, 2003, 2010, 2013.

240 Влияние тренировки на подвижный интеллект: Au et al., 2015.

241 Влияние приемной семьи на IQ ребенка: Duyme, Dumaret, & Tomkiewicz, 1999.

242 Влияние образования на IQ: Ritchie & Tucker-Drob, 2018.

243 Влияние когнитивного тренинга на концентрацию внимания, чтение и арифметику: Bergman-Nutley & Klingberg, 2014; Blair & Raver, 2014; Klingberg, 2010; Spencer-Smith & Klingberg, 2015.

244 Корреляция между рабочей памятью и последующей успеваемостью по математике: Dumontheil & Klingberg, 2011; Gathercole, Pickering, Knight, & Stegmann, 2004; Geary, 2011.

245 Совместная тренировка рабочей памяти и понятия числовой прямой: Nemmi et al., 2016.

246 Изучение китайского языка с няней, а не по видеоматериалам: Kuhl, Tsao, & Liu, 2003.

247 Совместное внимание и «естественная педагогика»: Csibra & Gergely, 2009; Egyed, Király, & Gergely, 2013.

248 Указывание на объект и запоминание его отличительных особенностей: Yoon, Johnson, & Csibra, 2008.

249 Псевдообучение у сурикатов: Thornton & McAuliffe, 2006.

250 Интеллектуальное и покорное копирование действий взрослых 14-месячными детьми: Gergely et al., 2002.

251 Социальный конформизм в восприятии: см., например, Bond & Smith, 1996.

Глава 8. Активное вовлечение

252 Классический эксперимент, позволяющий сравнить активных и пассивных котят: Held & Hein, 1963.

253 Статистическое усвоение слогов и слов: Nay et al., 2011; Saffran et al., 1996; также см. новейшие исследования лаборатории Г. Деан-Ламберц, посвященные научению у спящих

новорожденных.

254 Влияние глубины обработки слов на эксплицитную память: Craik & Tulving, 1975; Jacoby & Dallas, 1981.

255 Запоминание предложений: Auble & Franks, 1978; Auble, Franks, & Soraci, 1979.

256 «Усложнение условий научения...»: Zaromb, Karpicke, & Roediger, 2010.

257 Нейровизуализационные исследования влияния глубины обработки слов на память: Karur et al., 1994.

258 Активность префронтальных и гиппокампальных сетей во время непреднамеренного научения прогнозирует последующую ретенцию: Brewer, Zhao, Desmond, Glover, & Gabrieli, 1998; Paller, McCarthy, & Wood, 1988; Sederberg et al., 2006; Sederberg, Kahana, Howard, Donner, & Madsen, 2003; Wagner et al., 1998.

259 Запоминание осознанных и неосознанных слов: Dehaene et al., 2001.

260 Активное овладение сложными понятиями из области физики: Kontra, Goldin-Meadow, & Beilock, 2012; Kontra, Lyons, Fischer, & Beilock, 2015.

261 Сравнение традиционных лекций с деятельностным подходом к обучению: Freeman et al., 2014.

262 Неэффективность научения через открытия и других связанных с ним педагогических стратегий: Hattie, 2017; Kirschner, Sweller, & Clark, 2006; Kirschner & van Merriënboer, 2013; Mayer, 2004.

263 Чтобы быстро сложить все числа от 1 до 100, попробуйте сложить их попарно: $1 + 100$, $2 + 99$, $3 + 98$ и так далее. Каждая из этих пар в сумме дает 101. Таких пар 50, следовательно, сумма чисел от 1 до 100 – 5050.

264 Преимущества инструктивного руководства в сравнении с методикой чистых открытий: Mayer, 2004.

265 Городские легенды в образовании: Kirschner & van Merriënboer, 2013.

266 Миф о стилях научения: Pashler, McDaniel, Rohrer, & Bjork, 2008.

267 Вариации в количестве времени, которое посвящают чтению первоклассники: Anderson, Wilson, & Fielding, 1988.

268 Любопытство у детей младшего возраста и его связь с академическими достижениями: Shah, Weeks, Richards, & Kaciroti, 2018.

269 Чувствительность к новой информации дофаминергических нейронов: Bromberg-Martin & Hikosaka, 2009.

270 Стремление к новизне у крыс: Bevins, 2001.

271 Нейровизуализационные исследования любопытства: Gruber, Gelman, & Ranganath, 2014; также см. Kang et al., 2009.

272 Смех как эпистемическая эмоция, свойственная исключительно человеку: Hurley, Dennett, & Adams, 2011.

273 Смех и научение: Esseily, Rat-Fischer, Somogyi, O'Regan, & Fagard, 2016.

274 Обзор психологических теорий любопытства: Loewenstein, 1994.

275 Перевернутая U-образная кривая любопытства: Kang et al., 2009; Kidd, Piantadosi, & Aslin, 2012, 2014; Loewenstein, 1994.

276 Любознательность у робота: Gottlieb, Oudeyer, Lopes, & Baranes, 2013; Kaplan & Oudeyer, 2007.

277 Эффект Златовласки у 8-месячных младенцев: Kidd et al., 2012, 2014.

278 Метапознание у маленьких детей: Dehaene et al., 2017; Goupil, Romand-Monnier, & Kouider, 2016; Lyons & Ghetti, 2011.

279 Гендерные и расовые стереотипы в математике: Spencer, Steele, & Quinn, 1999; Steele & Aronson, 1995.

280 Стресс, тревожность, выученная беспомощность и неспособность учиться: Caroni et al., 2012; Donato et al., 2013; Kim & Diamond, 2002; Noble, Norman, & Farah, 2005.

281 Эксплицитная методика преподавания убивает детскую любознательность: Bonawitz et al., 2011.

Глава 9. Обратная связь

282 Grothendieck, 1986.

283 Согласно метаанализу Джона Хатти, величина эффекта обратной связи составляет 0,73 стандартных отклонения, что делает ее одним из наиболее мощных модуляторов научения (Hattie, 2008).

284 Правило научения Рескорлы—Вагнера: Rescorla & Wagner, 1972.

285 Подробную критику ассоциативного научения см. Balsam & Gallistel, 2009; Gallistel, 1990.

286 Блокировка обусловливания у животных: Beckers, Miller, De Houwer, & Urushihara, 2006; Fanselow, 1998; Waelti, Dickinson, & Schultz, 2001.

287 Удивление способствует научению у младенцев: Stahl & Feigenson, 2015.

288 Сигналы ошибки в мозге: Friston, 2005; Naatanen, Paavilainen, Rinne, & Alho, 2007; Schultz, Dayan, & Montague, 1997.

289 Удивление как отражение неверного прогноза: Strauss et al., 2015; Todorovic & de Lange, 2012.

290 Иерархия локальных и глобальных сигналов ошибки: Bekinschtein et al., 2009; Strauss et al., 2015; Uhrig, Dehaene, & Jarraya, 2014; Wang et al., 2015.

291 Удивление, вызванное неожиданной картинкой: Meyer & Olson, 2011.

292 Удивление, вызванное нарушением семантики: Curran, Tucker, Kutas, & Posner, 1993; Kutas & Federmeier, 2011; Kutas & Hillyard, 1980.

293 Удивление, вызванное нарушением грамматического правила: Friederici, 2002; Hahne & Friederici, 1999; критический обзор см. Steinhauer & Drury, 2012.

294 Ошибка прогноза в дофаминовой сети: Pessiglione, Seymour, Flandin, Dolan, & Frith, 2006; Schultz et al., 1997; Waelti et al., 2001.

295 Важная роль качественной обратной связи в школе: Hattie, 2008.

296 Научение методом проб и ошибок у взрослых и подростков: Palminteri, Kilford, Coricelli, & Blakemore, 2016.

297 Pennac, D. (11/02/2017). Daniel Pennac: «J'ai été d'abord et avant tout pro-fesseur». Le Monde. Источник: lemonde.fr.

298 Синдром математической тревожности: Ashcraft, 2002; Lyons & Beilock, 2012; Maloney & Beilock, 2012; Young, Wu, & Menon, 2012.

299 Влияние условной реакции страха на синаптическую пластичность: Caroni et al., 2012; Donato et al., 2013.

300 Установка на данность и установка на рост: Claro, Paunesku, & Dweck, 2016; Dweck, 2006; Rattan, Savani, Chugh, & Dweck, 2015. Обратите внимание, что в последнее время влияние этих установок, а значит, и их практическая значимость для школьного образования поставлены под сомнение: Sisk, Burgoyne, Sun, Butler, & Macnamara, 2018.

301 Влияние метода активного воспроизведения на научение: Carrier & Pashler, 1992; Karpicke & Roediger, 2008; Roediger & Karpicke, 2006; Szpunar, Khan, & Schacter, 2013; Zaromb & Roediger, 2010. Анализ относительной эффективности различных техник научения см. Dunlosky, Rawson, Marsh, Nathan, & Willingham, 2013.

302 Ретроспективная оценка степени уверенности облегчает научение: Robey, Dougherty, & Buttaccio, 2017.

303 Стратегия активного воспроизведения облегчает запоминание иностранных слов: Carrier & Pashler, 1992; Lindsey, Shroyer, Pashler, & Mozer, 2014.

304 Растягивание процесса научения во времени улучшает ретенцию: Cepeda et al., 2009; Cepeda, Pashler, Vul, Wixted, & Rohrer, 2006; Rohrer & Taylor, 2006; Schmidt & Bjork, 1992.

305 Влияние повторения на активность нейронов: Bradley et al., 2015; Callan & Schweighofer, 2010.

306 Эффект постепенного увеличения интервалов между уроками: Kang, Lindsey, Mozer, & Pashler, 2014.

307 Перетасовка математических задач улучшает научение: Rohrer & Taylor, 2006, 2007.

308 Обратная связь улучшает память даже при правильном ответе: Butler, Karpicke, & Roediger, 2008.

Глава 10. Консолидация

309 Переход от последовательного к параллельному распознаванию букв при формировании навыка чтения: Zoccolotti et al., 2005.

310 Лонгитюдные нейровизуализационные исследования формирования навыка чтения: Dehaene-Lambertz et al., 2018.

311 Роль теменной доли в чтении необычно написанных слов: Cohen, Dehaene, Vinckier, Jobert, & Montavont, 2008; Vinckier et al., 2006.

312 Зрительное распознавание наиболее распространенных буквенных сочетаний: Binder, Medler, Westbury, Liebenthal, & Buchanan, 2006; Dehaene, Cohen, Sigman, & Vinckier, 2005; Grainger & Whitney, 2004; Vinckier et al., 2007.

313 Настройка зрительной коры на восприятие букв: Chang et al., 2015; Dehaene et al., 2010; Sigman et al., 2005; Szwed et al., 2011, 2014.

314 Бессознательное чтение: Dehaene et al., 2001, 2004.

315 Автоматизация арифметических навыков: Ansari & Dhital, 2006; Rivera, Reiss, Eckert, & Menon, 2005. Роль гиппокампа в запоминании арифметических фактов: Qin et al., 2014.

316 Сон препятствует забыванию: Jenkins & Dallenbach, 1924.

317 Фаза быстрого сна повышает эффективность научения: Karni, Tanne, Rubenstein, Askenasy, & Sagi, 1994.

318 Сон и консолидация памяти: Huber, Ghilardi, Massimini, & Tononi, 2004; Stickgold, 2005; Walker, Brakefield, Hobson, & Stickgold, 2003; Walker & Stickgold, 2004.

319 Сверхэкспрессия гена zif-268 во время сна: Ribeiro, Goyal, Mello, & Pavlides, 1999.

320 Реактивация нейронов в течение ночи: Ji & Wilson, 2007; Louie & Wilson, 2001; Skaggs & McNaughton, 1996; Wilson & McNaughton, 1994.

321 Декодирование активности мозга во время сна: Chen & Wilson, 2017; Horikawa, Tamaki, Miyawaki, & Kamitani, 2013.

322 Улучшение памяти как основная функция сна: Diekelmann & Born, 2010.

323 Воспроизведение информации во время сна облегчает консолидацию памяти: Ramanathan, Gulati, & Ganguly, 2015; непосредственное влияние сна на синаптическую пластичность см. Norimoto et al., 2018.

324 Реактивация нейронов коры и гиппокампа во время сна у людей: Horikawa et al., 2013; Jiang et al., 2017; Peigneux et al., 2004.

325 Связь интенсивности медленных волн с повышением производительности: Huber et al., 2004.

326 Нейровизуализационные исследования влияния сна на моторное научение: Walker, Stickgold, Alsop, Gaab, & Schlaug, 2005.

327 Стимулирование медленных колебаний во время сна улучшает память: Marshall, Helgadóttir, Mölle, and Born, 2006; Ngo, Martinetz, Born, and Mölle, 2013.

328 Запахи могут влиять на консолидацию памяти во время сна: Rasch, Büchel, Gais, & Born, 2007.

329 Звуки стимулируют воспроизведение информации во время сна и повышают прочность запоминания: Antony, Gobel, O'Hare, Reber, & Paller, 2012; Bendor & Wilson, 2012; Rudoy, Voss, Westerberg, & Paller, 2009.

330 Невозможность усвоения нового материала во время сна: Bruce et al., 1970; Emmons & Simon, 1956. Тем не менее одно из новейших исследований показывает, что во сне мы можем усвоить ассоциацию между звуком и запахом (Arzi et al., 2012).

331 Gazsi, M. (08/06/2018). Philippe Starck: «I couldn't care less about my life». *The Guardian*, theguardian.com.

332 Математический инсайт во время сна: Wagner, Gais, Haider, Verleger, & Born, 2004.

333 Алгоритмы обучения на базе цикла «сон—бодрствование»: Hinton, Dayan, Frey, and Neal, 1995; Hinton, Osindero, & Teh, 2006.

334 Гипотеза о том, что у людей сон играет большую роль в консолидации памяти, чем у других приматов: Samson & Nunn, 2015.

335 Большая эффективность сна у детей, чем у взрослых: Wilhelm et al., 2013.

336 Маленькие дети обобщают значения слов после сна: Friedrich, Wilhelm, Born, & Friederici, 2015; Seehagen, Konrad, Herbert, & Schneider, 2015.

337 Положительный эффект дневного сна у дошкольников: Kurdziel, Duclos, & Spencer, 2013.

338 Недостаток сна и нарушения внимания: Avior et al., 2004; Cortese et al., 2013; Hiscock et al., 2015; Prehn-Kristensen et al., 2014.

339 Благотворное влияние переноса начала уроков на более позднее время у подростков: American Academy of Pediatrics, 2014; Dunster et al., 2018.

Заключение. Нейробиология в образовании

340 Искусственный интеллект, вдохновленный нейробиологией и когнитивистикой: Hassabis, Kumaran, Summerfield, & Botvinick, 2017; Lake et al., 2017.

341 См. PISA (*Program for International Student Assessment*; Международная программа по оценке образовательных достижений учащихся, oecd.org/pisa-fr), TIMSS (*Trends in International Mathematics and Science Study*; Международное мониторинговое исследование качества школьного математического и естественно-научного образования), PIRLS (*Progress in International Reading Literacy Study*; Международное исследование качества чтения и понимания текста, timssandpirls.bc.edu).

Алфавитный указатель

- AlphaGo 48, 62
- AlphaGo Zero 52–53
- Bucharest Early Intervention Project 145, 301, 313, 328
- C. elegans* (нематода) 16, 280, 295, 321
- DeepMind 31, 46–49, 58
- Duolingo 247
- Google 46, 48–49, 58, 315
- LeNet (алгоритм) 40, 42, 46, 321
- Lynx1 140
- Modus tollens (правило) 73
- «Neuronal Man» (Шанжё) 54
- Planum temporale (височная плоскость) 141
- «Probability Theory: The Logic of Science» (Джейнс) 74, 294
- «Reading in the Brain» (Деан) 161, 284, 330
- Science (журнал) 145, 203–204, 279, 281–283, 285–286, 289–290, 292–293, 295–298, 300–302, 304–307, 309–313, 317–319
- «Should There Be a Three-Strikes Rules against Pure Discovery Learning» (Майер) 212, 300
- Super Mario (видеоигра) 47
- Tetris (видеоигра) 42, 47, 259–260
- «The Number Sense» (Деан) 155, 292, 323
- А, не Б (ошибка) 194, 332
- А. Г. (девочка) 128
- Абстрактные законы 60–61, 63–64, 69, 212
- Автоматизация 40, 163, 192, 251, 253–254, 256, 258–259
- Адаптация 17, 79, 144, 152, 200, 203, 216, 235–236
- Акбар, Джалалуддин Мухаммад 137
- Аксон 100, 111–114, 122–124, 129–130, 134, 142–143, 181
- Активное вовлечение 21, 175–176, 207–208, 210–211, 214, 216–217, 224–225, 227–228, 232, 243–246, 271, 273, 333
- Алгоритм градиентного спуска 41–44
- Алгоритм имитации отжига 45
- Алексия 14, 167
- Ален (Эмиль-Огюст Шартье) 185, 229
- Алкоголь 126
- Амазонские индейцы 149–150, 328
- Амальрик, Мари 156–157
- Амблиопия (ленивый глаз) 134
- Аплизия калифорнийская 116, 326
- Апостериорная вероятность 76, 131
- Априорная вероятность 76, 80, 130

Априорные гипотезы 26, 52, 54
Аристотель 73, 199, 217
Арифметика, см. математика 20, 23, 59, 84–86, 155, 199, 216, 234, 254–255, 328
Ассоциация 16–17, 65, 109–110, 119–121, 126–127, 129, 140, 162, 182, 231–233, 245, 260, 265, 335, 337
Ацетилхолин 115, 140, 181–182, 331
Бавелье, Дафна 183
Базальные ганглии 120, 254
Байес, Томас 25, 72–74, 88
Байесовская теория 72–76, 88
Байесовские алгоритмы 24–25
«Байесовский мозг» 80, 130, 323
Баттро, Антонио 127, 276
Башляр, Гастон 97, 239
Бенджио, Йошуа 56, 178, 276
Бенченан, Карим 121
Бинокулярное зрение 134, 143, 327
Бонатти, Люка 89
Борн, Ян 260, 262
Брага, Лючия 11, 275
Бутстрэппинг 48, 67
Бухарестское исследование (Bucharest Early Intervention Project) 145, 328
Быстрого сна, фаза 256–257
Бэкон, Роджер 108
Вагнер, Аллан 230–234, 335
Везикулы 113–114
Вентральная область покрышки 218, 238
Вентральная часть височной доли 254
Вентральная часть зрительной коры 155, 167, 188–189
Вернике—Корсакова, синдром 125
Вероятности / теория вероятностей 21, 23–26, 33, 44–45, 73–76, 80–81, 84, 87–90, 95, 102, 109, 115, 117, 130–131, 163, 169, 198, 203, 219–220, 231–232, 234, 267–269, 323
Веселье 219
«Вечное сияние чистого разума» (фильм) 120
«Взлетная полоса» (фильм) 210
Видеоигры 46–49, 85, 183, 185, 196, 239, 241, 269, 321, 331
Виктор из Аверона 138
Виллани, Седрик 158, 160
Височная плоскость 141, 197
Внимание 21–22, 24, 27, 57, 66–67, 92, 134, 147, 156, 175–181, 183–193, 195–205, 208–211, 216–217, 220–221, 223, 232, 236, 243, 252–254, 265–266, 269, 271, 273, 322, 325, 328–329, 331–333, 336, 338 и отбор релевантной информации 178, 180 и переизбыток информации 177 система ориентировки 177, 181, 184 система сигнализации и активации 181–183, 331 системы внимания 180–181, 184, 190 управление вниманием 181, 190, 197, 199–200

Внутренние модели внешнего мира 25, 32, 72, 76, 208, 231, 263, см. ментальные модели
Восприятие лиц 92–93
Врба, Элизабет 152
Время 19–22, 27, 33–34, 39, 42, 45–49, 53, 56, 62–64, 67, 69, 73, 75, 82–83, 89, 91, 94, 97–99, 101–107, 109–110, 117, 120, 122–125, 127, 129–132, 134–137, 139–142, 144, 146, 148–149, 155–157, 160, 162, 175, 178–180, 182–185, 192–194, 198, 203, 205, 207–208, 210–212, 214, 216, 220, 224–225, 230, 233, 245–250, 252, 254–264, 269, 272–274, 325–326, 334, 336–338
Врожденные знания, навыки, способности 65, 67, 76, 86, 93–94, 108
Габитуация (привыкание) 16
Галилео Галилей 205, 221, 264
Ганглии 116, 120, 254
Гаусс, Карл 213
Гемианоптик 128
Гемисферэктомия 127
Геном 15–17, 21, 53–54, 100, 102, 108, 127
Гергели, Дьердь 92, 200, 276, 319
Герц-Паннье, Люси 98
Гиперактивные дети 265–266
Гиппокамп 86, 103, 112, 116, 117, 119–121, 210, 242, 257–259, 326, 334, 337
Глазные доминантные колонки 102
Глиальные клетки 123–124
Глубокий сон 256–257, 260, 265–266
Глубокое обучение 27, 56, 60, 63
Го, игра 22, 46, 48, 51–53, 62, 238, 321
Гондри, Мишель 120, 122
«Государство» (Платон) 79
Грамматические правила 36, 59, 79, 96, 324, 335
Гротендик, Александер 150, 156, 229–230, 243
Гудман, Ной 71
Гулд, Стивен Джей 152
Гумбольдт, Вильгельм фон 60
Далленбах, Карл 255
Дар абстракции 69
Дарвин, Чарльз 17, 96
Дарвиновский алгоритм 19, 45
Движение «от нуля до трех» 144
Деан-Ламбертц, Гилен 94, 98, 275, 333
Декарт, Рене 34, 62, 103
Декартовы координаты 103
Декроли, Овидий 211
Дельта-правило 232
Дендритный шипик 113, 123
Дендриты 111–113, 118, 122–124, 126, 132–133, 143, 172, 190

Деннетт, Дэн 220
Джеймс, Уильям 184, 220
Джейнс, Э. Т. 74, 90
Дженкинс, Джон 255
Джини (девочка) 138
Дилан, Боб 274
ДНК 15, 100, 124
Долговременная потенция 116, 180, 326
Допущение взаимного исключения 67
Дофамин / дофаминовая система 115, 121, 181–183, 218–219, 222, 226, 238, 331, 334–335
Дугообразный пучок 100
Дуэк, Кэрл 243
Дьюи, Джон 211
Дюпу, Эммануэль 58
Естественный отбор 17, 53, 152, 321
Жакоб, Франсуа 152
Жиру, Эммануэль 13, 157–158, 160
Знания о людях и животных (у младенцев) 90, 270
Зона Брока 61, 99–100, 107, 155, 158, 237, 329
Зрительная кора 13, 75, 92, 102, 105, 129–130, 133, 155, 158–159, 162, 164–165, 167–168, 188, 237, 253, 329–330, 337
Зрительный контакт 92, 199–201
Зюдхоф, Томас 113
Иерархическая декомпозиция 39
Иерархический алгоритм обучения 70
Избирательное внимание 179, 184–185, 188, 195
Изменения IQ 20, 197–198
Индивидуальность 107–108
Инсульт 14, 139, 167
Интеграция внимания 178
Интервальное повторение 247–249
Интуитивные представления 82, 84, 87, 110, 148, 169
Ирики, Ацуси 122, 125
Искусственные нейронные сети 25, 35, 39–42, 46, 48, 50–52, 54–63, 65–66, 79, 88, 106, 178–179, 217, 230–232, 238–239, 321–322, 331 см. искусственный интеллект глубокие (глубинные) сети 39, 40, 42, 321 иерархическая организация 39 самоорганизация 106, 109 сверточные нейронные сети 51–52, 56, 321
Искусственный интеллект 15, 31, 41, 43, 47–50, 55–57, 62, 64, 66, 85, 106, 124, 178, 238–239, 267, 338 см. искусственные нейронные сети
Исследование пространства возможностей 43
Исполнительный контроль 333
Кандел, Эрик 116
Кантор, Георг 60
Каплан, Фредерик 221–222

Капчи 57, 322
Кахаль, Сантьяго Рамон 111–112
Кекуле фон Штрадониц, Август 261, 265
Келлер, Хелен 13
Классическое обусловливание 231
Клетки Пуркинье 123
Кнудсен, Эрик 142, 276
Комплексификация 133
Компоновка 61, 127, 129, 161
Конн, Ален 168
Консолидация 21, 27, 175–176, 252–254, 257–265, 273–274, 336–338
Концептуализация бесконечности 60
Кора пространственная сегрегация коры 102 самоорганизация коры 325 формирование складок 101, 107
Козн, Лоран 162, 275
Культурного храповика, эффект 200, 206
Лаплас, Пьер-Симон маркиз де 72–74
Лекун, Ян 40, 42, 46, 51–52
Ленивый глаз 134, 141 см. амблиопия
Лобная доля 75, 99, 156, 158, 190, 210
Логика 21, 23–24, 72–74, 79, 88–89, 121, 240–241, 323
Ложные воспоминания 120, 326
Локальный минимум 43, 45
Локк, Джон 12, 81
Любопытство (любопытность) 22, 27, 37, 46, 85, 129, 175, 189, 212, 217–227, 252, 269, 271, 273, 334 см. активное вовлечение
Майер, Ричард 214
Маккэндлисс, Брюс 187, 275–276
Макнотон, Брюс 257–258
«Маленький принц» (Сент-Экзюпери) 13, 157
Маркер, Крис 210
Математика 13–14, 19, 26–27, 39, 41, 59–60, 70, 72, 75, 85, 103, 108, 110, 124, 149–150, 153, 155–161, 167–171, 182–183, 199, 211, 213, 216, 225, 227, 229–230, 242–243, 267, 269–271, 329–331, 335
Математическая тревожность 242, 336
Машинное обучение 22, 31, 34, 41, 45, 55, 63, 73, 263
Ментальные модели 21, 25, 27, 32–34, 64, 76, 79, 170, 175, 182, 208, 220, 235, 263–264
корректировка внутренней модели 34, 175, 235
корректировка методом проб и ошибок 34
корректировка параметров 35–36
Мерзенич, Майкл 181–182
Метакогнитивные способности 222
Метапознание 20, 49, 222, 224–225, 335
Метаправила 64–67, 69–70
Метод активного воспроизведения 244, 246

Метод интервального повторения 247–248
Метод целых слов 188–189, 332
Миелин 113, 123
Миелинизация 131, 134
Миндалевидное тело 116, 242
Минимизация ошибок 39
Мишле, Жюль 205
Младенцы 13, 23, 26–28, 36, 53, 56, 61, 67, 76, 79, 81–85, 87–94, 96–100, 104, 125–126, 134–135, 148, 156, 169, 171, 194, 199–201, 206, 209, 221–222, 235, 265, 267, 270, 323–324, 335
Мобилизация 228, 254
Модель блокировки 165
Модель нокаута 165, 330
Мозг как статистик 26 см. вероятности / теория вероятностей
Мозг как ученый 24, 80
Мозер, Мэй-Бритт 103
Мозер, Эдвард 103
Мозжечок 124
Монтень, Мишель 267
Монтессори, Мария 196, 212, 333
Монтессори, школы 196
Морской слизень 175 см. аплизия калифорнийская
Мотивация 27, 91, 182, 208, 214, 216, 220–221, 226, 241, 244, 271
Моторная кора 101, 254, 259
МРТ 97–100, 105, 109, 123, 165, 218, 259, 329
Музыка 20, 59, 108, 123, 144, 167–169, 182, 196–197, 221, 227, 237, 247, 254, 271, 326, 330, 333
Мультизадачность 254
Мундуруку 149, 328
Набоков, Владимир 149–150
«Навигатор» 103–104, 155
Наказание 22, 49, 226, 239–241, 243
Нарушения (расстройства) внимания 22, 265–266, 338
Нарушения развития 21, 216, 274 аутизм 92, 110 дискалькулия 14, 22, 109–110, 325 дислексия 14, 22, 109–110, 164, 216, 325, 330 диспраксия 12, 22
Научение с одной попытки 59, 64, 258
Научение через открытия 211–212, 214, 216, 228, 334
Невидимая горилла (эксперимент) 185–187
Неграмотные люди 20, 149–150, 162–164, 166, 170, 328, 330
Нейрональное глобальное рабочее пространство 191–192, 332
Нейронного рециклинга, гипотеза 148, 150, 152–156, 158–159, 161–162, 169, 328–329
Нейроны анатомия нейрона 111, 118 нейроны места 104, 257–258, 325 нейроны решетки 103–104, 107, 155, 161, 325, 329 числовые нейроны 86, 106, 156, 159, 323, 325, 329
Нейропластичность 13, 22, 110, 122, 144, 151, 153, 183, 242, 257, 268, 270–271, 328, 331

Нейротрансмиттеры 113–115, 121–122
Нельсон, Чарльз 145
Нематода 16–17, 175, 321
Нервные клетки 12, 112, 114, 116–117, 185 см. нейроны
Нет удивления – нет научения (правило) 234, 237
Неэффективность научения через открытия 211, 334
Нидер, Андреас 106
Нижневисочная кора 167
Нико (художник) 13, 127–129, 276
Никотин 182
Новых слов, усвоение 65, 67, 322, 328
Ньютон, Исаак 157, 264, 267
Области поиска, ограничение 50
Обобщение 51–52, 60, 189, 201, 257, 265
Обратная связь 21–22, 27, 46, 101, 175–176, 229–234, 239–240, 244–248, 251, 272, 276, 335–336
Обратное распространение ошибки 35, 42–43, 232, 235
Обучение с подкреплением 46, 48, 232, 321
Обучение с учителем (контролируемое обучение) 46, 232, 239
Обучение у сурикатов 203–205, 333
Оптимизация функции вознаграждения 46
Отметки 22, 226, 240–241, 243–245
Отсутствие научения у пассивных организмов 208–209
Охотник, регулирующий прицел своего ружья 34, 41, 231
Ошибка прогноза 231–234, 238, 335
Ошибки в направлении внимания, последствия 180
Павловское обусловливание 65, 233
Паллье, Кристоф 141, 276
Память 20–21, 27, 49, 64, 66, 95, 115–120, 122, 124, 127, 143, 149, 180–181, 190–191, 194, 198–199, 209–210, 213, 219, 242, 244–247, 249–251, 254–262, 269–270, 272, 326, 333–334, 336–337 кодирование воспоминаний 210 процедурная 119–120, 257 рабочая 118, 191, 194, 198–199, 246, 249, 326, 333 семантическая 119, 180 эпизодическая 116, 119–120, 210, 258
Парагиппокампальная кора 117, 210
Парвальбумин 139
Пашлер, Хэл 249–250
Пейперт, Сеймур 212–213
Пеннак, Даниэль 242, 244
«Переворот в сознании» (Пейперт) 213
Переобучение (переподгонка) 50
Перинейрональная сеть 139, 242
Пиаже, Жан 7, 87, 193–194, 212, 220, 267
Пинкер, Стивен 93
Пирахан 149, 328

Питание 124–126, 145, 147, 326
Платон 79, 149
Подвижный интеллект 198, 333
Познер, Майкл 180, 196
Понятие о физических объектах 82–84, 97, 234, 267, 270, 323
Поппер, Карл 72
Постсинаптический нейрон 112–116
Потенциал действия (пиковый потенциал, спайк) 112
Предвзятая конкуренция 185
Пресинаптический нейрон 112, 115
Префронтальная кора 118, 132, 134, 156, 170, 180–181, 193–198, 209–210, 237, 253–254, 331–334
Привязанность 92
Приемные дети 137, 139, 141, 170, 328
«Принципы психологии» (Джеймс) 184
Припоминание 118
Проверка 156, 206, 208, 244–248, 256, 266, 268, 330
Прогнозирование ошибок
Прогностические сигналы 238
Прозак 139
«Происхождение человека» (Дарвин) 96
Проклятие размерности 50
Просодия 94, 96
Простейшая модель, которая согласуется с данными 68
Псамметих I (фараон) 137
Разум 13, 62, 110, 120, 157, 185
Распознавание 23, 35, 42–43, 51–52, 55, 57, 79, 92–93, 105, 149–150, 161–163, 164–169, 252–253, 321, 324–325, 328, 330, 336
распознавание лиц 92–93, 105, 163–169, 324–325, 328, 330
Рассуждение 15, 63, 67, 72–73, 89, 100, 241, 243, 264, 269
«Рассуждение о методе» (Декарт) 62
Редигер, Генри 245, 272
Рескорла, Роберт 231–232
Рескорлы—Вагнера, теория 231–234, 335
Рико (собака) 70, 322
Роботы 16, 220–223, 335
«Розовая пантера» (фильм) 135
Рузвельт, Теодор 229, 243
Руссо, Жан-Жак 7, 81, 211–212, 217
Самопроверка 246, 248
Седоль, Ли 48
Семантическая память 119, 180
Сензитивный период 131, 133–140, 143–144, 167, 182, 242, 270, 327–328

Сенсорные сигналы 71, 130, 143, 185, 231–232, 236, 263, 267
Сенсорные системы 39, 180, 208
Сент-Экзюпери, Антуан де 13
«Серебряный» (Конан Дойль) 73
Серотонин 181–182
Сети «актор—критик» 47, 238
Сибра, Гегели 200
Сигналы ошибки 27, 42, 75–76, 231, 234–239, 251, 335
Силлогизмы 73–74, 90
Синапсы 12, 25, 27, 36, 112–118, 120–125, 129–130, 132–133, 139, 148, 169–170, 172, 175, 180, 189, 242, 270, 326–327
Синаптическая пластичность 115–116, 127, 130, 133, 139–140, 143, 150, 175, 182, 258, 326, 336–337
Синтаксическое движение 138, 144
Систематичность 22, 59–60, 322
Слепые математики 157–158, 267, 329
Слуховая кора 99, 116, 129–131, 134–135, 235–238, 327
Случайность 44–45, 75, 89, 106, 109, 130, 242, 256–257, 323–324
Сновидения 33, 259, 263
Совместное внимание 66–67, 199, 202, 322, 333 коммуникативное намерение в основе акта указания пальцем 201
Сон 24, 249, 255–261, 263–266, 268–269, 272, 337–338 и перенос воспоминаний 258 недостаток сна 266, 269, 338 открытия во время сна 265 продолжительность и глубина сна 257 ускорение нейронных разрядов во время сна 262
Сондерсон, Николас 157, 267
Состязательное обучение 49, 321
Сохранения количества, закон 194
Социальное научение 58, 200, 205
Социальный конформизм 206, 333
Спайк 112, 130
Старк, Филипп 262
Стили научения (миф) 215, 324
Сур, Мриганка 129, 131
Сью, Фэй 89, 276
Теменная кора 105, 107, 156, 253–254, 325
Тененбаум, Джош 71, 84, 106, 276
Теория «чистого листа» 129, 148, 169
Терминаль аксона 100, 111, 113–114, 118, 123, 131, 142
Тестирование 245, 256, 262–263
Тиамин 125–126, 138, 327
Томаселло, Майкл 200
Тонегава, Судзуми 120–121
Тьюринг, Алан 75–76, 81, 102, 157–158, 322
Удейе, Пьер-Ив 221–222

Уилсон, Мэттью 257–258, 276
Установка на данность 243–244, 336
Установка на рост 243–244, 272, 336
Фейгенсон, Лиза 234
Фелипе (мальчик) 11–13, 267
Фетальный алкогольный синдром 126
Флуоксетин (Прозак) 139
Фодор, Джерри 60
Фон Нейман, Джон 50
Фонология 99, 109, 134–136, 138, 141, 209, 325
Формулы (уравнения) 58, 60–61, 71, 125, 156, 168–169
Франклин, Бенджамин 97
Френе, Селестен 212
Фридман, Наама 126, 275
Фридрих II 137
Хассабис, Демис 31, 262
Хебб, Дональд 115, 220
Хебба, правило 115, 122
Хейн, Алан 207–208
Хелд, Ричард 207–208
Хомский, Ноам 96
Хофштадтер, Дуглас 57
Хэтти, Джон 239
Центральное узкое место 191, 332
Цимане 58, 149, 328
Цифровые аборигены (миф) 215
Чаушеску, Николае 144–146
Чо, Кюхён 178
Чтение 14, 20, 27, 108–109, 123, 149, 153, 155, 161–167, 171, 183, 187–189, 195, 199, 201, 210–212, 214, 216, 225, 246, 252–255, 271, 324, 330–334, 336–338
Чувство пространства 105, 161
Чувство числа 85, 87, 110, 150, 155, 160–161, 270, 323, 329
«Шадоки» (мультфильм) 230, 234
Шанжё, Жан-Пьер 54
Шеррингтон, Чарльз 112
Шизофрения 110шт
Школы / школьное обучение 11, 13, 19–20, 22, 28, 121, 127, 137, 148–151, 153, 155, 157, 159–160, 163, 165–167, 169–171, 175, 193–194, 196, 198–199, 204, 208, 211, 224, 230, 239–244, 250, 265–266, 269, 271, 273–275, 335, 338
«Школьные страдания» (Пеннак) 242
Шульц, Лора 237
Эббингауз, Герман 255–256
Эббингауза, кривая забывания 250, 255

Эволюция
Эйнштейн, Альберт 150, 217, 264
Экзамены 240, 246–247, 250, 332
Экзотация 152
Эксперимент с каруселью 207–208, 211
Эксперимент с совами 139–143
«Эмиль, или О воспитании» (Руссо) 7, 81, 212, 217
Эмоциональной и социальной изоляции, последствия (Бухарестское исследование) 147
Эмпиризм 7, 12, 54, 157–158, 323–324
Энигма 75–76
Энторинальная кора 103–105, 107, 155, 329
Эпистемическая любознательность 219, 224
Эрген, Мари 13, 321
Эффект глубины обработки 209–210, 334
Эффект Златовласки 222, 335
Эффект культурного храповика 200, 206
Эффект мигания внимания 186, 332
Эффект расстояния 160, 330
Эффективность обработки данных в научении 57
Явление блокировки 233
«Язык как инстинкт» (Пинкер) 93
Язык второго языка, освоение 136, 140–141, 170, 270, 327 и глухие дети 138–139 и комбинаторный взрыв 37, 50 грамматический контекст 67 лексический взрыв 69 освоение абстрактных слов 56, 64–66, 156, 158, 210, 213 развитие «магистралей» мозга во внутриутробном периоде 99–100 формирование словарного запаса 65 языковой инстинкт младенца 93, 96 язык мышления 58–60, 65, 71, 79, 91, 124, 219, 232, 322, 330
Яков IV, король Шотландии 137

Иллюстрации

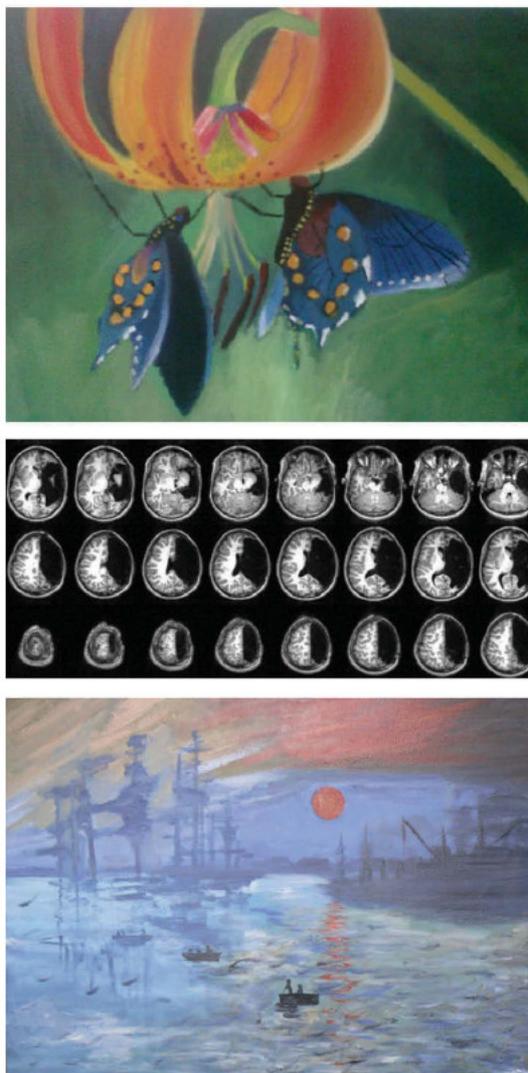


Иллюстрация 1

Иногда нейропластичность позволяет компенсировать утраченные функции. В возрасте трех лет Нико перенес хирургическую операцию по удалению правого полушария (см. МРТ-срезы в середине). И все же это не помешало ему стать успешным художником. Он не только пишет восхитительные копии (внизу), но и собственные картины (вверху). Благодаря научению мозг Нико сумел втиснуть все свои таланты, включая речь, математику, чтение и рисование, в одно полушарие.

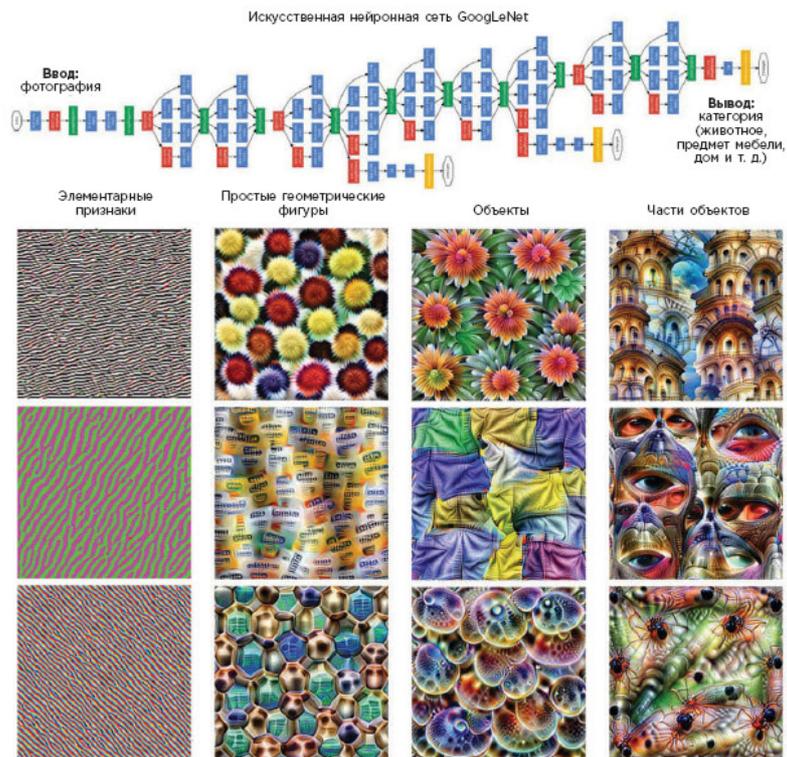


Иллюстрация 2

Процесс научения предполагает формирование иерархии репрезентаций, соответствующих характеру поставленной задачи. В искусственной нейросети GoogLeNet, которая учится классифицировать изображения, настройка миллионов параметров позволяет каждому уровню иерархии распознавать некий важный аспект реальности. Так, искусственные нейроны самого низкого уровня реагируют на элементарные признаки, например наклонные линии или текстуры. Нейроны более высоких уровней распознают сложные формы, например лошадей, глаза или насекомых.

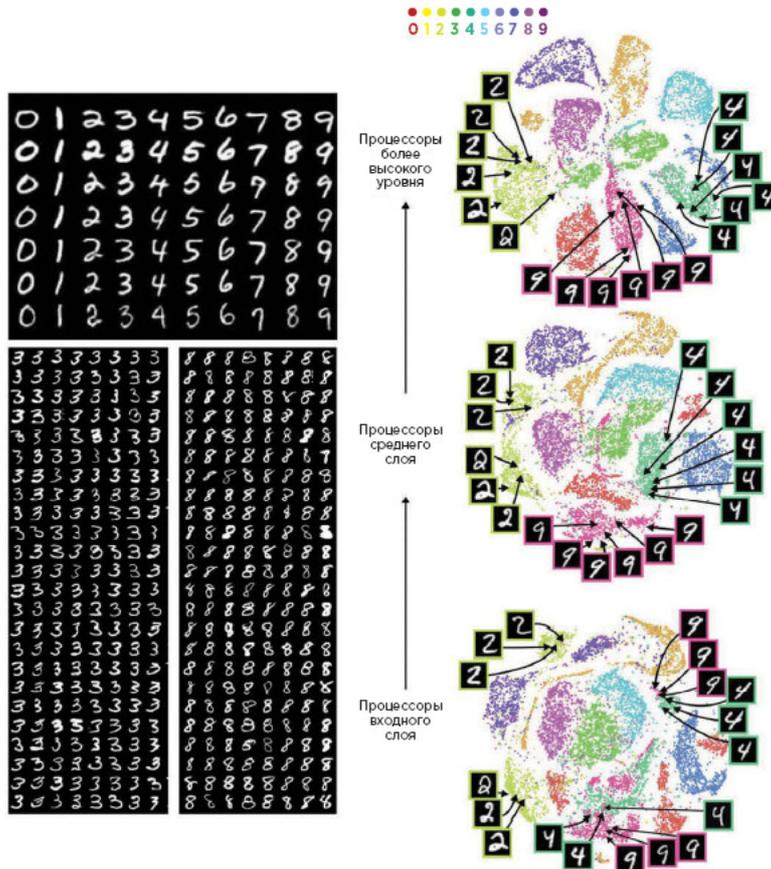


Иллюстрация 3

Как глубокая нейросеть учится распознавать рукописные цифры? Это сложная задача: любую цифру можно написать по-разному. На низшем уровне иерархии (внизу справа) искусственные нейроны путают цифры, которые выглядят похоже, например 9 и 4. Чем выше уровень иерархии, тем успешнее нейроны распознают и группируют вместе разные варианты написания одной и той же цифры.

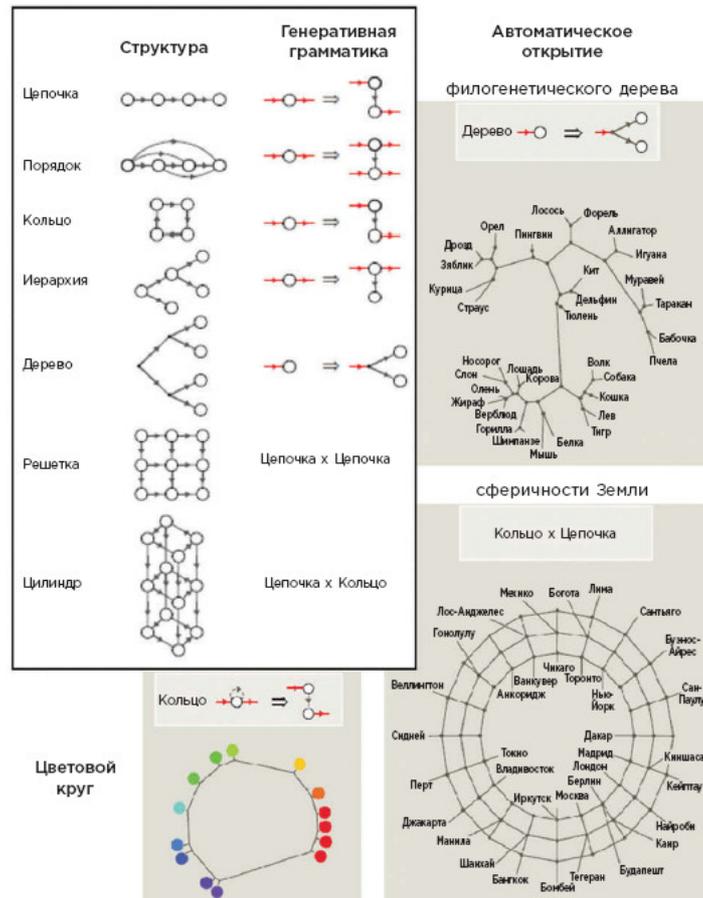


Иллюстрация 4

Научение предполагает вывод общих правил и законов, действующих в той или иной сфере. Два программиста из Массачусетского технологического института изобрели алгоритм, способный обнаруживать скрытую структуру научных знаний. Система надлена сводом правил, комбинации которых генерируют самые разнообразные структуры: линии, плоскости, круги, цилиндры. Выбирая структуру, наилучшим образом отвечающую данным, алгоритм совершает открытия, на которые у ученых ушли годы: филогенетическое дерево животного мира (Дарвин, 1859), шарообразность Земли (Парменид, 600 г. до н. э.), цветовой круг (Ньютон, 1675).

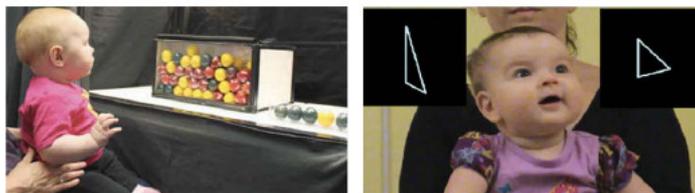


Иллюстрация 5

Мозг младенца отнюдь не «чистый лист»: напротив, он содержит обширный набор базовых знаний и допущений об окружающей среде. В лабораторных условиях ученые изучают присущие младенцам интуитивные представления о мире, наблюдая за их реакцией на ситуации, нарушающие законы физики, арифметики, вероятности или геометрии.

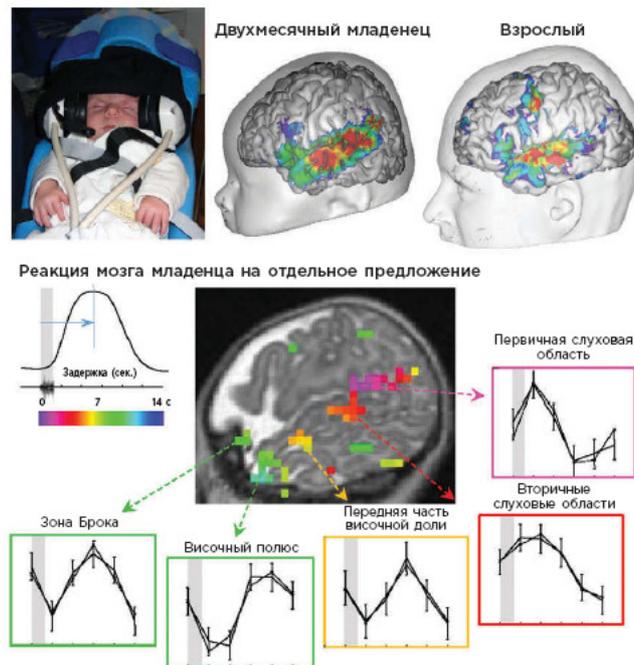


Иллюстрация 6

С самого рождения мозг младенца перенаправляет устную речь в левое полушарие. Как показывает фМРТ, в мозге младенцев, слушающих предложения на родном языке, активны те же отделы, что и у взрослых. Активность возникает в первичной слуховой области, после чего постепенно распространяется на височную и лобную доли, в том же порядке, что и у любого взрослого человека. Эти данные опровергают теорию об изначально дезорганизованном мозге, «чистом листе», который приобретает свое содержание исключительно под влиянием окружающей среды.

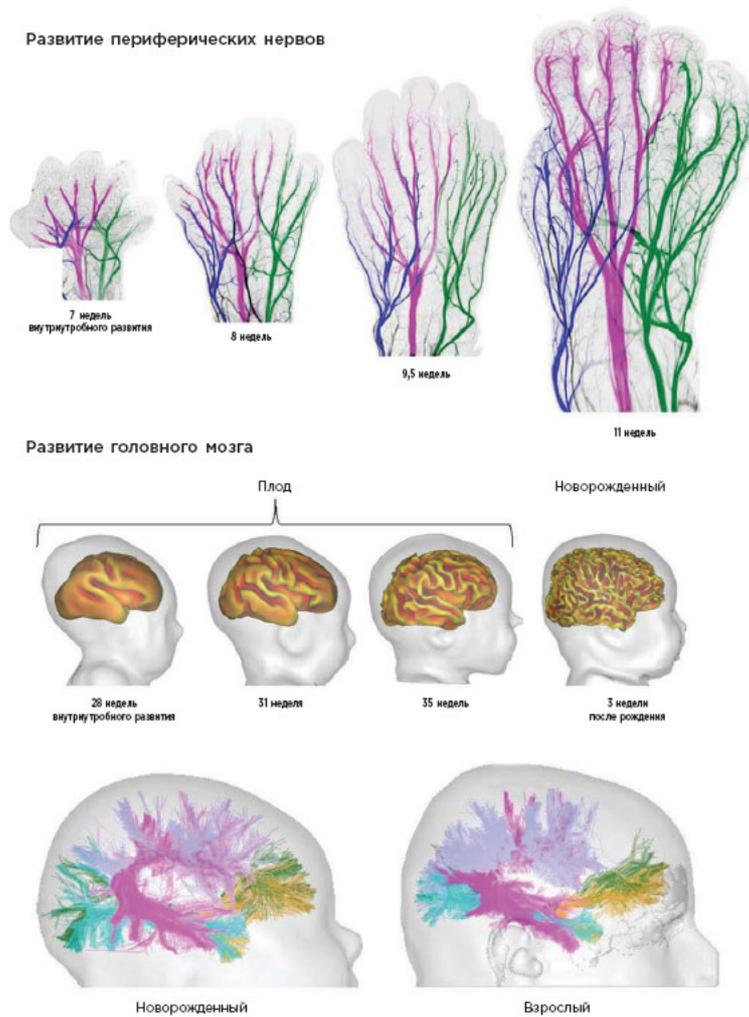
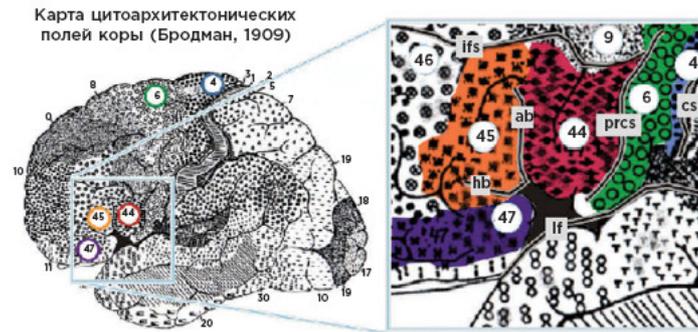


Иллюстрация 8

В первые недели беременности тело самоорганизуется под влиянием генов. Формирование пяти пальцев и их иннервация не требуют научения. Аналогичным образом закладывается фундаментальная архитектура головного мозга. При рождении кора уже организована; развиты складки и связи, присущие всем людям и отличающие нас от других приматов. Точная структура синаптических связей, однако, может варьировать в зависимости от окружающей среды. К третьему триместру беременности мозг плода начинает адаптироваться к информации, поступающей из внешнего мира.



Границы между отделами коры, определенные четырьмя рецепторными молекулами

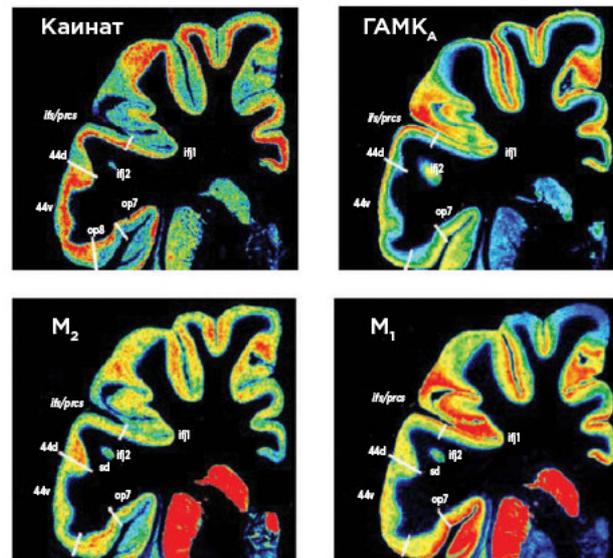


Иллюстрация 9

Кора головного мозга человека подразделяется на несколько специализированных отделов. Еще в 1909 году немецкий невролог Корбиньян Бродман заметил, что с точки зрения размера и распределения нейронов кора неоднородна. Так, в зоне Брока, отвечающей за обработку речи, Бродман выделил три области (44, 45 и 47). Позже их существование было подтверждено с помощью методов молекулярной визуализации. На границах отделов наблюдаются скачкообразные вариации в плотности рецепторов нейротрансмиттеров. В период внутриутробного развития определенные гены избирательно экспрессируются в разных участках коры и содействуют ее подразделению на специализированные зоны.

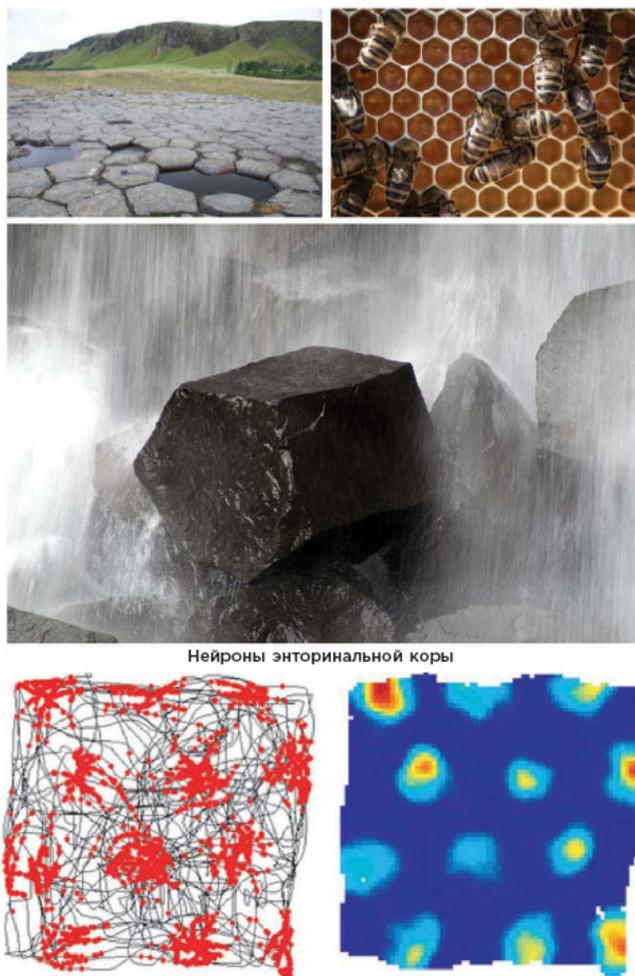


Иллюстрация 10

В процессе самоорганизации физической системы, будь то лава или пчелиный воск, часто образуются шестиугольники. Нервная система не исключение: в области энторинальной коры – встроенного навигатора мозга – нейроны самоорганизуются в «клетки решетки», накладывающие на физическое пространство воображаемую сеть треугольников и шестиугольников. Как только крыса, исследующая просторное помещение, оказывается в вершине одного из таких треугольников, срабатывает соответствующий нейрон. Клетки решетки появляются уже через день после того, как крысята начинают самостоятельно перемещаться; таким образом, можно утверждать, что чувство пространства основано на почти врожденной системе навигации.

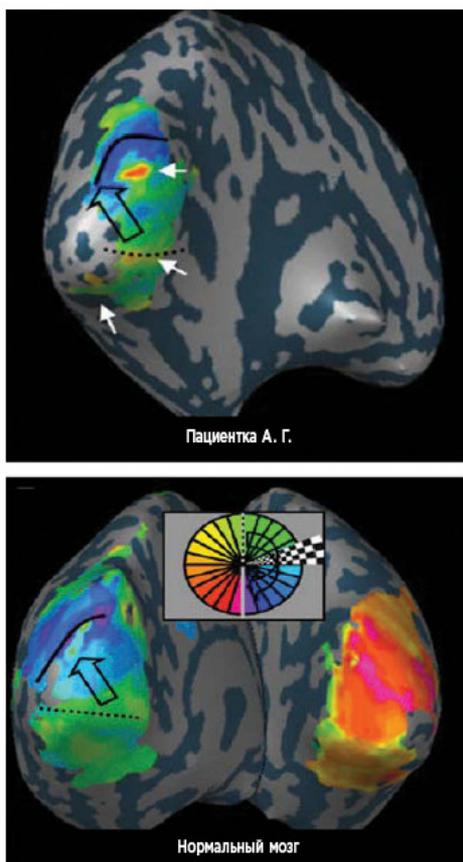


Иллюстрация 11

Синаптическая пластичность позволяет мозгу частично реорганизовываться в случае обширных повреждений. Пациентка А. Г. (вверху) родилась только с одним полушарием: правое прекратило развиваться на седьмой неделе гестации. В нормальном мозге (внизу) первичные зрительные области левого полушария реагируют только на правую половину зрительного поля (на диске показана голубым и зеленым). Однако у А. Г. небольшие области левого полушария подверглись перестройке и начали реагировать на левую половину зрительного поля (обозначена белыми стрелками). Благодаря этому А. Г. способна различать слабый свет и движение в левой части зрительного поля, в отличие от взрослого, у которого правое полушарие было удалено в ходе хирургической операции. Тем не менее подобная реорганизация возможна только в очень узких пределах: в первичной зрительной коре генетический детерминизм превалирует над нейропластичностью.

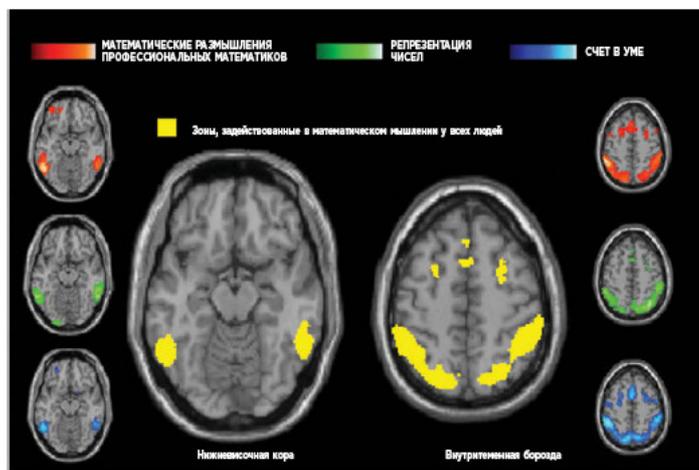
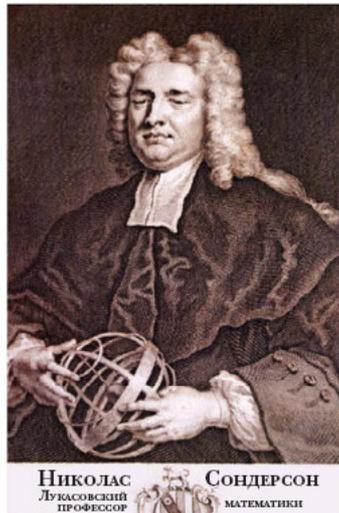
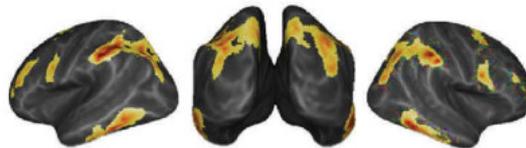


Иллюстрация 12

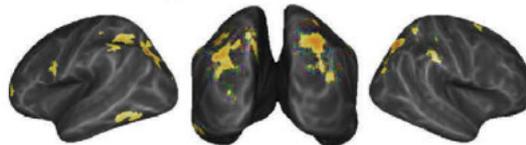
Образование состоит в перепрофилировании древних нейронных цепей на новые функции. В частности, области, присутствующие в мозге с младенчества и репрезентирующие числа (показаны зеленым), впоследствии используются для вычислений в уме (показаны синим). Эти же отделы задействуют и профессиональные математики (показаны красным). Данные нейронные сети изначально реагируют на конкретное количество предметов, но позже переориентируются на более абстрактные понятия.



Пятнадцать зрячих математиков



Три слепых математика

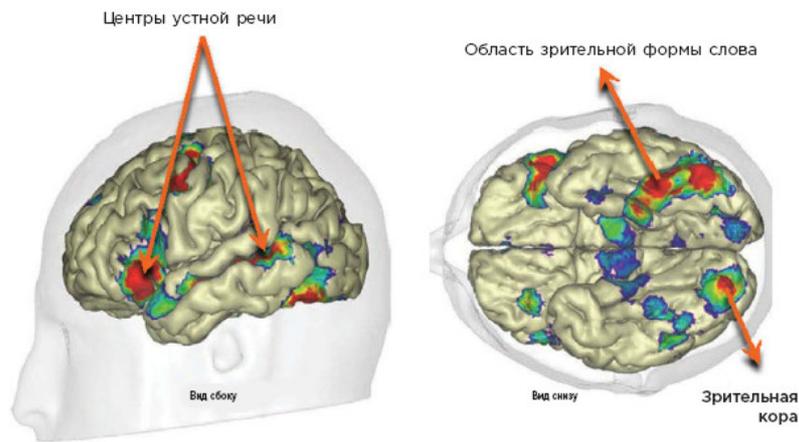


Дополнительная активация зрительной коры у слепых математиков



Иллюстрация 13

Овладение математикой практически не зависит от сенсорного опыта. Даже слепой может стать выдающимся математиком. Примечательно, что во время вычислений у слепых и зрячих математиков активны одни и те же зоны теменной, височной и лобной долей. Единственное различие состоит в том, что первые задействуют еще и зрительную кору.



Реакция мозга на письменные предложения

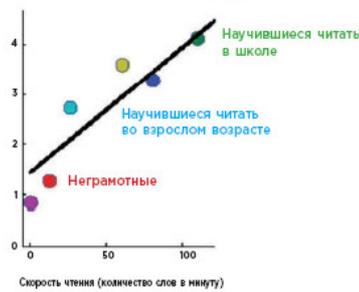


Иллюстрация 14

Формирование навыка чтения предполагает переориентацию сети корковых областей, задействованных в обработке зрительной информации и устной речи. Цветом выделены участки, изменяющие свою активность в процессе овладения чтением: чем выше скорость чтения, тем интенсивнее они реагируют на написанное слово. Умение читать и писать оказывает двойное воздействие на мозг: оно обуславливает специализацию зрительных областей на буквах, особенно в так называемой «области зрительной формы слова» в левом полушарии, и активирует нейронные сети, отвечающие за устную речь, через зрение.

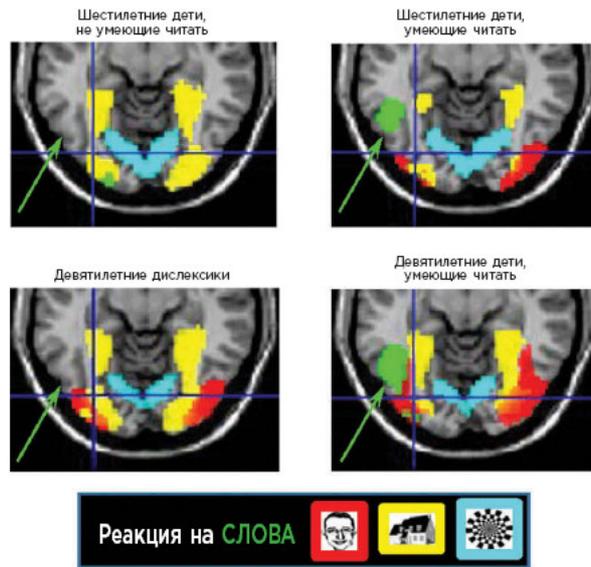


Иллюстрация 15

Функциональная МРТ позволяет отследить формирование навыка чтения у детей. Как только ребенок научается читать, зрительная область его левого полушария начинает активно реагировать на цепочки букв. В процессе овладения чтением происходит переориентация ряда областей, которые приматы используют для распознавания лиц, предметов и мест.

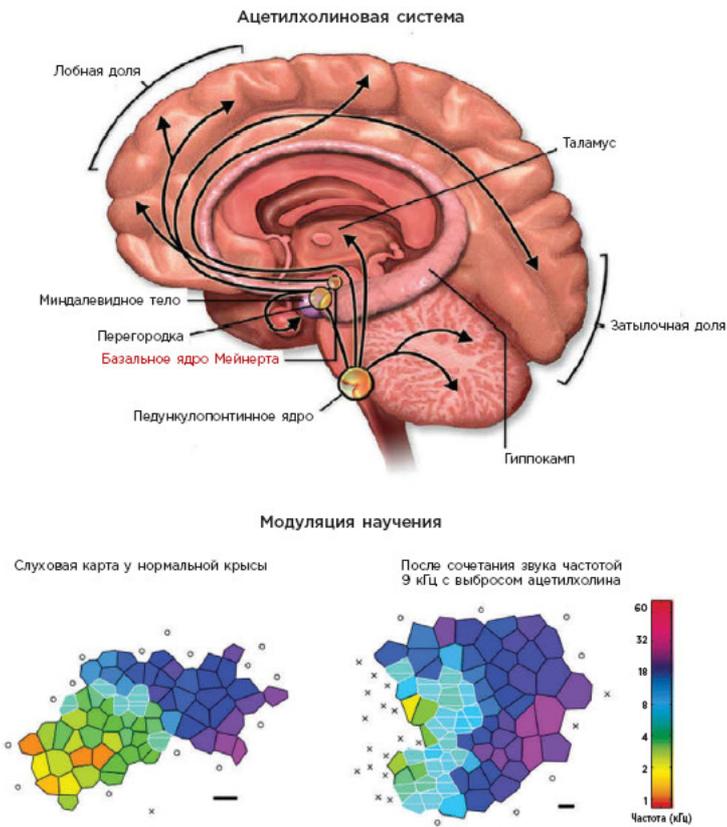


Иллюстрация 16

Система сигнализации и активации может оказывать существенное влияние на научение. Такие нейромодуляторы, как серотонин, ацетилхолин и дофамин, сигналы которых распространяются на большую часть коры, подсказывают нам, когда необходимо сосредоточиться, и заставляют мозг учиться. В одном из экспериментов на крысах (внизу) звук частотой 9 килогерц сопровождался электрической стимуляцией базального ядра Мейнерта, провоцирующей высвобождение ацетилхолина. Через несколько дней на эту частоту, а также близкие к ней частоты реагировала вся слуховая кора (активные области показаны голубым).

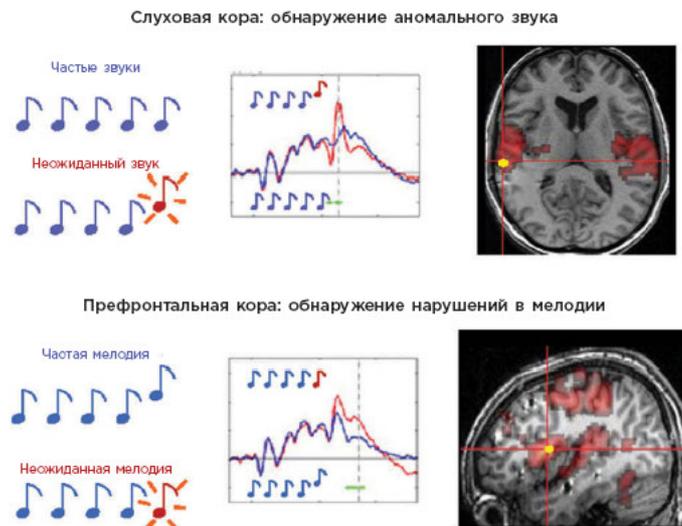


Иллюстрация 17

Обратная связь – третий столп научения. Обнаруживая и исправляя ошибки, мозг учится приспосабливать свои модели к окружающей среде. Сигналами ошибки обмениваются практически все отделы. В рамках одного из экспериментов мозг учится обнаруживать нарушения в последовательности звуков. Сперва испытуемый несколько раз прослушивает короткую мелодию из пяти нот. Когда последовательность меняется без предупреждения, реакция удивления (показана красным) сигнализирует об ошибке и позволяет другим областям мозга скорректировать свои прогнозы. Если слуховые области реагируют на локальные нарушения ожиданий (вверху), то обширная сеть, включающая префронтальную кору, – на глобальное изменение мелодии (внизу).

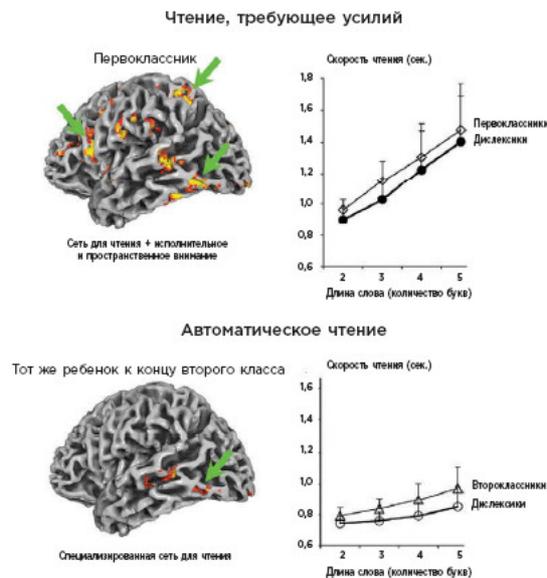


Иллюстрация 18

Консолидация – четвертый столп научения. Первоначально всякое научение требует значительных усилий, которые сопровождаются интенсивной активностью теменной и лобных долей, обеспечивающих пространственное и исполнительное внимание. На начальных этапах овладения чтением, например, дешифровка слова – медленный, трудоемкий и последовательный процесс: чем больше букв в слове, тем ниже скорость чтения (вверху). С опытом развивается автоматизм: чтение становится быстрым, параллельным и бессознательным (внизу). В результате формируется специализированная сеть для чтения, позволяющая высвободить ресурсы коры для других задач.

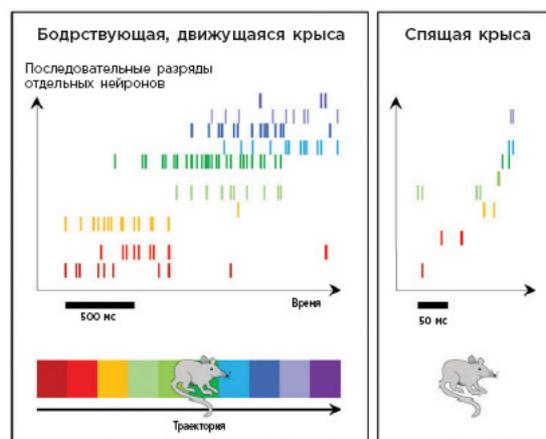


Иллюстрация 19

Сон играет важную роль в консолидации усвоенного материала. Когда крыса засыпает, нейроны в ее гиппокампе в ускоренном темпе воспроизводят свое состояние во время бодрствования. Эти паттерны активности распространяются на кору и в течение ночи могут повторяться сотни раз. Нейронная реактивация помогает консолидировать и автоматизировать все, что было усвоено накануне. Более того, пока мы спим, наш мозг может обнаружить закономерности, которые ускользнули от нас днем.

ЛУЧШИЕ КНИГИ О БИЗНЕСЕ С ЛОГОТИПОМ ВАШЕЙ КОМПАНИИ? ЛЕГКО!

Удивить своих клиентов, бизнес-партнеров, сделать памятный подарок сотрудникам и рассказать о своей компании читателям бизнес-литературы? Приглашаем стать партнерами выпуска актуальных и популярных книг. О вашей компании узнает наиболее активная аудитория.

ПАРТНЕРСКИЕ ОПЦИИ:

- Специальный тираж уже существующих книг с логотипом вашей компании.
- Размещение логотипа на супер-обложке для малых тиражей (от 30 штук).
- Поддержка выхода новинки, которая ранее не была доступна читателям (50 книг в подарок).

ПАРТНЕРСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ:

- Рекламная полоса о вашей компании внутри книги.
- Вступительное слово в книге от первых лиц компании-партнера.
- Обращение первых лиц на суперобложке.
- Отзыв на обороте обложки вложение информационных материалов о вашей компании (закладки, листовки, мини-буклеты).



У вас есть возможность обсудить свои пожелания с менеджерами корпоративных продаж. Как?

Звоните:
+7 495 411 68 59, доб. 2261

Заходите на сайт:
eksmo.ru/b2b



notes

Примечания

Оскар Рибейру ди Алмейда ди Нимейер Суарис Филью (1907–2012) – латиноамериканский архитектор XX века, один из основателей современной школы бразильской архитектуры. (*Прим. перев.*)

В современной переводной литературе английский термин *circuit* переводится по-разному – «сеть», «цепь», «связь», «ансамбль», «контур», «комплекс», «система», «путь» и пр., хотя для всех этих структур в английском языке существуют свои термины. В настоящей книге мы будем использовать вариант «нейронная сеть», понимая под ней совокупность живых нейронов, соединенных друг с другом через синапсы и выполняющих общую функцию. (*Прим. перев.*)

Номо досенс (лат.) – букв. Человек обучающий. (Прим. перев.)

На данный момент в науке нет однозначной точки зрения на этот счет. Ряд авторов предполагает, что активно обучают своих детенышей как минимум некоторые виды млекопитающих; возможно, и другие животные. См., например: Alem, S., Perry, C. J., Zhu, X., Loukola, O. J., Ingraham, T., Søvik, E., & Chittka, L. (2016). Associative mechanisms allow for social learning and cultural transmission of string pulling in an insect. *PLoS Biology*, *14*(10), e1002564. (Прим. научн. ред.)

In silico (лат. «в кремнии») – термин, обозначающий компьютерное моделирование эксперимента; создан по аналогии с *in vivo* и *in vitro*. (Прим. перев.)

In vivo (*лат.* «внутри живого организма», «внутри клетки») – латинский термин, обозначающий проведение экспериментов на живом организме. (*Прим. перев.*)

Спор о *tabula rasa* является одним из старейших споров в философии и связан с представлением о том, рождаются люди с уже заложенными в них индивидуальными различиями или нет. (*Прим. научн. ред.*)

Plastovski – слово с нетипичным для английского языка окончанием; swoon («обморок») и wistful («задумчивый») – типичные английские слова; dragostan – слово, отсутствующее в английском языке, но имеющее допустимый для английского языка фонетический и морфологический состав. (*Прим. перев.*)

Русский язык принадлежит к группе языков с таким же порядком слов, что и английский. Такая группа языков называется SVO (от англ. *Subject – Verb – Object*). Однако в русском языке – так же как, например, в финском или венгерском – этот порядок не подчиняется столь же жестким правилам, как в английском. (*Прим. научн. ред.*)

Вы можете проверить свой словарный запас (а также внести вклад в науку) с помощью интернет-ресурса – <https://myvocab.info/>

Tour de force (*франц.*) – *букв. «подвиг». (Прим. перев.)*

Вымышленный глагол из искусственной фразы на основе русского языка «Глокая куздра штеко будланула бокра и курдячит бокрёнка», предложенной Л.В. Щербой в 1930-е годы.
(Прим. перев.)

Декарт, Р. Рассуждения о методе. М.: АСТ, 2019. (Прим. перев.)

Конан Дойль, А. Серебряный. / А. Конан Дойль. Собрание сочинений. В 8 т. – М.: Издательство «Правда», 1966. – Т. 2. (Прим. перев.)

Руссо, Ж.-Ж. Эмиль, или О воспитании. / Ж.-Ж. Руссо. Педагогические сочинения. В 2 т. – М.: Педагогика, 1981. – Т. 1. (Прим. перев.)

Конан Дойль, А. Берилловая диадема. / А. Конан Дойль. Собрание сочинений. В 8 т. – М.: Издательство «Правда», 1966. – Т. 1. (Прим. перев.)

Данное исследование вызвало споры в научном сообществе, не все согласны с корректностью интерпретации авторов и с тем фактом, что плод действительно реагирует именно на световые паттерны. См.: Scheel, A. M., Ritchie, S. J., Brown, N. J. L., & Jacques, S. L. (2017, October 27). *Through a womb, darkly: Methodological problems in a recent study of fetal visual perception.* (Прим. научн. ред.)

Пинкер, С. Язык как инстинкт. – М.: Едиториал УРСС, 2004. (Прим. перев.)

Дарвин, Ч. Происхождение человека и половой отбор. / *Ч. Дарвин.* Сочинения. В 9 т. – М., 1953. – Т. 5. (*Прим. перев.*)

Башляр, Г. Философское отрицание: Опыт философии нового научного духа. / *Г. Башляр.* Новый рационализм. – М.: Прогресс, 1987. (*Прим. перев.*)

My Funny Valentine и My Romance – известные джазовые композиции Ричарда Роджерса (музыка) и Лоренца Харта (слова) 1937 и 1935 годов соответственно. (*Прим. перев.*)

Генри Густав Молисон (1926–2008). *(Прим. перев.)*

Гемисферэктомия – операция, при которой происходит удаление одного из полушарий мозга. *(Прим. научн. ред.)*

Parfait – «образцовый» (*франц.*); langue – «язык» (*франц.*) (*Прим. перев.*)

Нейроны концепций – нейроны, которые специфически активируются при восприятии определенных комплексных изображений вроде лиц конкретных людей. (*Прим. научн. ред.*)

Сриниваса Рамануджан Аijenгор (1887–1920) – гениальный индийский математик-самоучка, сформулировавший около 120 теорем. (*Прим. перев.*)

Насчет эффективности любых типов игр в качестве стимуляторов внимания, а также их использования для улучшения когнитивных способностей в научном сообществе ведутся активные споры. См., например: <http://longevity.stanford.edu/a-consensus-on-the-brain-training-industry-from-the-scientific-community-2/>. (Прим. научн. ред.)

Законы трех ошибок или трех преступлений (англ. *Three strikes laws*) – законодательные акты США, на основании которых суды штатов должны приговаривать тех, кто совершил три серьезных преступления, к длительному тюремному заключению. (*Прим. перев.*)

Цифровые аборигены, или цифровое поколение (англ. *Digital Natives*) – термин, предложенный Марком Prensky для обозначения людей, родившихся после цифровой революции и привыкших получать информацию через цифровые каналы. (*Прим. перев.*)

От англ. глагола *to zap* – быстро переключать телевизионные каналы, пока идет реклама.
(Прим. перев.)

Дядя Сэм (англ. *Uncle Sam*) – персонифицированный образ Соединенных Штатов Америки. Чаще всего его изображают пожилым белым мужчиной с тонкими чертами лица, старомодной бородкой, в цилиндре, синем фраке и полосатых панталонах. (*Прим. перев.*)

Прогнозирование будущего результата как основной механизм организации поведения было представлено в работах П.К. Анохина и Н.А. Бернштейна в СССР в 1950-е. (*Прим. научн. ред.*)

Букв. «Сияй, сияй, маленькая звездочка». (Прим. перев.)

Так же как и в случае исследований, посвященных эффективности когнитивных игр, данные исследования вызывают горячие споры. Согласно одному из последних метаанализов, эффект «образа мыслей» в концепции Дуэк практически не влияет на эффективность обучения. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0956797617739704>
(Прим. научн. ред.)

2-е послание Коринфянам 13:5. *(Прим. перев.)*

Монтень, М. Опыты. / М. Монтень. Избранные произведения. В 3-х томах. – М.: Голос, 1992. – Т. 1. (Прим. перев.)

Россия в 2015 году заняла 4-е место среди 11-классников по математике (в 2015 году у Франции – 6-е) и 2-е место среди 11-классников по физике (у Франции – 9-е). (*Прим. научн. ред.*)