

ДЭВИД ИГЛМЕН

нейробиолог, профессор  
Стэнфордского университета

# ЖИВОЙ МОЗГ

УДИВИТЕЛЬНЫЕ ФАКТЫ  
О НЕЙРОПЛАСТИЧНОСТИ  
И ВОЗМОЖНОСТЯХ МОЗГА

МИФ

David Eagleman

# LIVEWIRED

## The Inside Story of the Ever-changing Brain

Pantheon Books  
New York

*Серия «Гибкое мышление»*

Дэвид Иглмен

# ЖИВОЙ МОЗГ

## Удивительные факты о нейропластичности и возможностях мозга

*Перевод с английского Елены Лалаян*

Москва  
«Манн, Иванов и Фербер»  
2022

УДК 159.922  
ББК 88.211  
И26

Научный редактор Ксения Пахорукова  
*На русском языке публикуется впервые*

**Иглмен, Дэвид**  
И26      Живой мозг. Удивительные факты о нейропластичности и возможностях мозга / Дэвид Иглмен ; пер. с англ. Е. Лалаян ; [науч. ред. К. Пахорукова]. — Москва : Манн, Иванов и Фербер, 2022. — 336 с. — (Гибкое мышление).

ISBN 978-5-00169-987-3

Почему враг памяти — не время, а другие воспоминания? Почему мы каждую ночь видим сны и как это связано с вращением нашей планеты? Что общего между отменой лекарственного препарата и разбитым сердцем? Ответы на эти и многие другие вопросы — в новой книге известного нейробиолога Дэвида Иглмена. Вас ждут невероятные факты о величайшей технологии, скрывающейся в вашей голове. И это не просто рассказ о том, что такое мозг и как он работает. Вы узнаете, благодаря чему наш мозг способен меняться на протяжении всей жизни и как научиться контролировать его деятельность, чтобы сделать свою жизнь еще лучше.

УДК 159.922  
ББК 88.211

*Все права защищены.  
Никакая часть данной книги не может быть воспроизведена в какой бы то ни было форме без письменного разрешения владельцев авторских прав.*

ISBN 978-5-00169-987-3

© David Eagleman, 2020. All rights reserved.  
© Издание на русском языке, перевод, оформление.  
ООО «Манн, Иванов и Фербер», 2022

# СОДЕРЖАНИЕ

Глава 1. Наэлектризованная живая ткань .....	9
Глава 2. Просто добавь реальности .....	25
Глава 3. Внутреннее как зеркало внешнего .....	34
Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает .....	62
Глава 5. Как раздобыть себе тело получше .....	128
Глава 6. Почему значение имеет значение .....	160
Глава 7. Почему глубина любви познается лишь в час разлуки? .....	182
Глава 8. Балансируя на грани перемен .....	198
Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам? .....	218
Глава 10. Помнишь, как... .....	235
Глава 11. Про волка и марсоход .....	261
Глава 12. Найти давно почившую любовь Этци .....	271
 Примечания .....	277
Дополнительная литература .....	319
Список иллюстраций .....	330
Благодарности .....	332
Об авторе .....	334



Каждый человек рождается подобным многим,  
но умирает неповторимым.

*МАРТИН ХАЙДЕГГЕР\**

---

\* Мартин Хайдеггер (1889–1976) — немецкий мыслитель, один из крупнейших философов XX века. *Прим. ред.*



# ГЛАВА 1

## НАЭЛЕКТРИЗОВАННАЯ ЖИВАЯ ТКАНЬ

Представьте такую картину: вместо того чтобы отправлять на Марс робот-вездеход весом 180 кг, мы просто запускаем на Красную планету одну-единственную малюсенькую сферическую частицу, которая может уместиться на острие иглы. На Марсе эта микросфера подключается к окружающим ее местным источникам энергии и делится на огромное количество аналогичных сфер разнообразного назначения. Сфера сцепляются одна с другой и на наших глазах приобретают форму конкретных конструктивных элементов марсохода: вот колеса, объективы, температурные датчики, полнокомплектная автономная система управления. Увидев, как эта хитроумная система сама себя развертывает, вы получили бы незабываемые впечатления.

Между тем достаточно зайти в роддом по соседству, и перед вашим взором предстанет точно такая же распаковка в действии. Покрикивающие на разные лады младенцы, чье существование начиналось с микроскопической оплодотворенной яйцеклетки, прямо здесь и сейчас, на свободе, приступают к преобразованию себя в огромных — по сравнению с их нынешней крохотностью — взрослых со всеми полагающимися им встроенными фоторецепторами, суставчатыми руками-ногами, датчиками давления, насосами для прокачки крови и сложнейшими механизмами для усвоения энергии из окружающей среды.

И все же не это лучшее, что есть в человеке, — у нас имеется нечто куда более завораживающее. Наша внутренняя механика не запрограммирована целиком и полностью от рождения, а активно формирует сама себя в ходе взаимодействия с окружающим миром. С самого детства и далее по жизни мы постоянно переписываем свою нейронную сеть, чтобы преодолевать трудности и принимать вызовы, оборачивать себе на пользу открывающиеся возможности и постигать устройство и способы функционирования разнообразных структур общества.

## Живой мозг

Наш вид обжил и освоил все уголки планеты, потому что в человеке воплотился во всей своей гениальности изобретенный Матушкой-природой трюк: вместо описанного во всех подробностях мозга она наделяет нас базовым комплектом мозговых структур и отправляет самостоятельно баражтаться в мире. В какой-то момент истощно воящий младенец замолкает, с любопытством осматривается и начинает постигать мир вокруг себя. Мозг подстраивается под ту жизненную среду, в которой оказался. Он впитывает все ее реалии — от языка до культурных норм и представлений о глобальной политике, несет по жизни убеждения и предубеждения тех, кто воспитал его. Всякое приятное воспоминание, которое откладывается в мозге, любой усвоенный им урок, каждая воспринятая крупица информации формируют его нейронные схемы, выстраиваясь в нечто уникальное, что никогда не планируется заранее, а отражает окружающую реальность.

Эта книга расскажет, как наш мозг непрерывно и неустанно перестраивает свои нейронные связи и каково значение этой деятельности для нашей жизни и нашего будущего. По ходу дела мы уделим внимание множеству интересных вопросов. Почему в 1980-е годы (и только в 1980-е!) люди замечали, что книжные страницы имеют легкий красноватый отлив? Почему лучшим в мире лучником стал человек без рук? Почему мы каждую ночь видим сны и как это связано с вращением нашей планеты? Что общего между симптомами отмены наркотического вещества и переживанием горя? Почему главный враг памяти не время, а другие воспоминания? Как незрячий может научиться видеть при помощи языка, а глухой — слышать кожей? Сможем ли мы когда-нибудь считывать хотя бы в общих чертах главные вехи чьей-либо жизни по микроскопическим структурам в чащах его мозговых клеток?

## Малыш с половинкой мозга

Валери С. собиралась на работу, когда ее трехлетний сын Мэтью рухнул на пол без сознания<sup>1</sup>. Привести его в чувство никак не получалось. Губы мальчика посинели.

Валери в панике позвонила мужу. «Что ты мне звонишь? — прорычал он. — Скорую вызывай!»

Визит в отделение неотложной помощи обернулся чередой направлений к специалистам. Педиатр рекомендовал показать Мэтью кардиологу.

Тот подсоединил Мэтью кардиомонитор, но мальчик ухитрялся раз за разом отключать его. Хождения по другим врачам тоже не выявили конкретного нарушения. Ничего страшного, единичный случай — так, во всяком случае, все думали.

Спустя месяц, во время еды, лицо Мэтью вдруг приняло странно застывшее выражение. Взгляд сделался напряженным, правая рука одеревенела и сама собой вытянулась вверх над головой; примерно с минуту мальчик пребывал в ступоре. Валери снова бросилась к врачам, но они и на этот раз не нашли ничего определенного.

На следующий день странный приступ повторился.

Невролог надел Мэтью шлем с закрепленными на нем электродами, чтобы измерить электрическую активность мозга, и у мальчика обнаружились явные признаки эпилепсии. Мэтью были назначены противосудорожные препараты.

Лекарства помогли, но ненадолго. Вскоре у ребенка начались серии некупируемых приступов: сначала раз в час, потом в три четверти часа, затем в полчаса — так у роженицы сокращаются промежутки между схватками. Через какое-то время приступы происходили уже каждые две минуты.

С началом очередной серии Валери и ее муж Джим отвозили сына в больницу, где он оставался на несколько дней, а то и недель. После нескольких таких серий наученные опытом родители дожидались, пока частота «схваток» достигнет двадцати минут, звонили в больницу предупредить, что едут, сажали сына в машину и по дороге заезжали в «Макдоналдс» купить ему что-нибудь поесть.

Сам Мэтью между приступами изо всех сил старался радоваться жизни.

Каждый год мальчик по десятку раз попадал в больницу. Так продолжалось три года. Валери с Джимом горько оплакивали потерю здорового сына: нет, ему не грозило умереть, но ребенок больше не мог жить нормальной жизнью. Мать с отцом прошли горестный путь от гнева на злую судьбу до отрицания. Их понятия о нормальной жизни неумолимо менялись. И вот пришел момент, когда во время трехнедельного пребывания Мэтью в больнице неврологи признали, что его болезнь слишком серьезна, чтобы справиться с ней силами местной больницы.

Родители наняли самолет санитарной авиации и перевезли сына из Альбукерке в балтиморский госпиталь Джонса Хопкинса на Восточном побережье. Там, в педиатрическом отделении интенсивной терапии, они узнали, что у Мэтью редкое хроническое воспалительное

## Живой мозг

заболевание — энцефалит Расмуссена. Коварство этой болезни в том, что она поражает не какой-то один малый участок мозга, а целое полушарие. Валери и Джим изучали возможные варианты лечения и очень встревожились, узнав, что единственный известный способ облегчить состояние Мэтью — гемисферэктомия, то есть хирургическое удаление пораженного полушария мозга. «Я не могу вспомнить ни слова из того, что позже говорили врачи, — рассказывала Валери. — Просто отключалась, как будто со мной говорили на незнакомом языке».

Валери с Джимом пробовали другие методы лечения, но они не дали результата. Через несколько месяцев Валери позвонила в госпиталь Джонса Хопкинса, чтобы назначить день операции, и врач спросил: «Вы уверены?»

«Да», — ответила Валери.

«И сможете каждый день смотреть себе в глаза в зеркале, зная, что сами приняли такое решение?»

От бесконечной съедающей их тревоги Валери и Джим лишились сна. Переживет ли Мэтью операцию? Насколько вообще возможно жить при отсутствии половины мозга? И даже если возможно, не обречен ли Мэтью после удаления одного полушария получить инвалидность настолько тяжелую, что жизнь с ней немногим лучше смерти?

Но другого выхода не было. Нормальная жизнь под дамокловым мечом ежедневных множественных эпилептических припадков попросту нереальна. Родители ловили себя на том, что взвешивают, стоит ли неясный исход хирургического вмешательства того ущерба, который болезнь гарантированно нанесет их сыну.

В назначенный день они снова привезли Мэтью в Балтимор. И вот уже под маской детского размера мальчик погружается в анестетический сон. Лезвие скальпеля осторожно делает разрезы на обритой коже головы. Костная дрель выскрывает в черепе круглое трепанационное отверстие.

На протяжении нескольких часов хирург кропотливо удалял нежную розоватую мозговую ткань, составлявшую основу интеллекта Мэтью, его эмоций, способности говорить, чувства юмора, страхов и привязанностей. Извлеченная ткань, бесполезная в отрыве от своей биологической среды, отправлялась в маленькие контейнеры. Опустевшая половина черепа Мэтью медленно заполнялась спинномозговой жидкостью, что в ходе нейровизуализации отображалось черным пятном (рис. 1.1)<sup>2</sup>.



Рис. 1.1. У Мэтью хирургически удалена половина головного мозга

Позже, уже в послеоперационной палате, родители Мэтью пили больничный кофе стакан за стаканом, ожидая, когда сын проснется после наркоза. Каким он теперь будет, их мальчик? Кем вырастет, имея всего половину мозга?

\*\*\*

Среди всех материальных объектов, обнаруженных представителями нашего вида на планете, ни один и близко не сравнится по сложности с нашим мозгом. Человеческий мозг состоит из 86 млрд клеток, называемых *нейронами*, которые быстро передают туда-сюда информацию в виде перемещающихся электрических импульсов<sup>3</sup>. Нейроны соединены друг с другом в густые замысловатые сети вроде лесных зарослей, причем общее количество нейронных соединений исчисляется сотнями триллионов (около 0,2 квадриллиона). Все это напоминает электрическую проводку в вашем доме. Чтобы лучше представить себе масштабы собственного мозга, исходите из того, что в одном кубическом миллиметре его кортикальной ткани связей больше, чем ныне живущих на нашей планете людей.

Однако самую интересную особенность мозга составляет не колосальное количество нейронов, а способ их взаимодействия.

Учебники, реклама в СМИ и масскультура обычно изображают мозг как орган, каждый участок которого отвечает за свой круг задач. Скажем, вот эта область позволяет нам видеть, а вон та полоска нужна, чтобы мы понимали, как пользоваться орудиями и инструментами, вот этот участок активируется, когда мы преодолеваем желание съесть конфетку, а вон то пятнышко оживляется, когда мы обдумываем щекотливый нравственный вопрос. Словом, все области, участки и зоны мозга можно четко обозначить и подразделить на категории.

## Живой мозг

Однако такая хрестоматийная модель не дает полного представления о мозге человека, ибо упускает самую любопытную его особенность. Мозг представляет собой динамическую систему и непрерывно меняет конфигурацию соединений в соответствии с требованиями внешней среды и возможностями тела. Будь у вас волшебная видеокамера, чтобы взять крупным планом кипящий жизнью микрокосм под сводами вашего черепа, вы увидели бы, как нейроны вытягивают свои отростки-щупальца, которые жадно ищут, за что бы ухватиться, ощущают, соударяются, наталкиваются друг на друга, выискивают подходящие, чтобы сформировать новые связи или, наоборот, избежать их, — так жители какой-нибудь страны завязывают дружбу, заключают браки, поддерживают соседские отношения, создают политические партии, совершают вендетты и объединяются в социальные общества. Попробуйте представить свой мозг как место, где обитают, переплетаются и живут своей жизнью триллионы отдельных организмов. Мозг намного удивительнее, чем рисуют нам учебники, поскольку представляет собой загадочную вычислительную субстанцию, живую трехмерную ткань, которая меняется, реагирует и приспособливается к изменениям, чтобы максимизировать свою продуктивность. Замысловатый рисунок соединений в мозге — *нейронные сети* — полнится жизнью: связи между нейронами беспрестанно меняются, расцветают, отмирают, изменяют форму. Сегодня вы уже не та личность, какой были год назад, потому что гигантский gobelen вашей мозговой ткани соткался в другой узор.

Когда вы что-то узнаёте, например адрес хорошего ресторана либо новую сплетню о вашем боссе, или слышите по радио новую привязчивую песенку, ваш мозг физически меняется. То же происходит с ним при финансовом успехе, социальном фиаско или эмоциональном возбуждении. Когда вы бросаете в корзину баскетбольный мяч, не соглашаетесь с коллегой, прилетаете в новый город, вглядываетесь в ностальгическую фотографию или слышите ласковые нотки в голосе любимого человека, обширные густо переплетенные джунгли вашего мозга перестраиваются, становясь слегка другими, чем мгновение назад. Эти перемены составляют нашу память — последствия того, как мы жили и любили. Бесчисленные изменения в мозге, накапливающиеся с течением минут, месяцев, а то и десятилетий, в общей сложности и складываются в личность, которая называется *вами*.

Или по крайней мере в ту личность, коей вы являетесь в данную минуту. Вчера вы были немного не такими, как сегодня. А завтра станете другими, кем раньше не были.

## Другой секрет жизни

В один из дней 1953 года Фрэнсис Крик\* ворвался в паб «Игл-энд-Чайлд» и с места в карьер ошарашил почтенную выпивающую публику, возгласив, что они с Джеймсом Уотсоном\*\* разгадали секрет жизни: открыли структуру двойной спирали ДНК. То было одно из величайших открытий в науке, известия о которых когда-либо сотрясали стены пабов.

Позже выяснилось, что Крик и Уотсон разгадали лишь половину секрета. Зато другую половину невозможно найти в зафиксированной последовательности пар оснований ДНК, не описана она и ни в одном учебнике — ни сейчас, ни когда-либо вообще. Потому что вторая половина секрета жизни — это все, что нас окружает, и каждая частичка нашего опыта бытия в мире: текстуры и вкусы, нежности и автомобильные аварии, языки общения и романы<sup>4</sup>.

Чтобы лучше понять, о чем я толкую, представьте, что вы родились 30 тысяч лет назад, причем с точно такой же ДНК, — разве что, покинув материнское лоно, увидели мир, каким он был в те далекие исторические времена. Какими бы вы выросли? Находили бы вкус в том, чтобы, облачившись в шкуры, танцевать вокруг костра, дивясь на россыпи звезд в ночном небе? Или, сидя на верхушке дерева, предупреждали бы соплеменников громким выразительным ревом о приближении страшного саблезубого тигра? Тревожила бы вас ночевка под открытым небом, когда его обкладывали густые дождевые тучи?

Что бы вы себе ни представили, все равно ошибетесь. Потому что мой вопрос — с подвохом.

Вы попросту были бы не вами. Даже отдаленно. Пещерный человек с точно такой же ДНК, как ваша, мог бы внешне слегка смахивать на вас в силу того, что развился по той же, что у вас, прописи генома. Но, как этот дикарь ни старался, он не сумел бы думать, как вы. И уж подавно не мог бы выстраивать стратегии в точности, как это делаете вы, любить, как вы, воспроизводить ваше прошлое или моделировать будущее.

Почему? Потому что у пещерного человека опыт жизни совсем не такой, как ваш. Безусловно, ДНК — часть истории вашей жизни, но очень-очень маленькая. Зато остальная ваша жизнь богата насыщена подробностями вашего опыта и вашей среды, и все это образует безбрежную

---

\* Фрэнсис Крик (1916–2004) — британский молекулярный биолог, биофизик и нейробиолог.�ауреат Нобелевской премии. Прим. ред.

\*\* Джеймс Уотсон (р. 1928) — американский биолог.�ауреат Нобелевской премии. Прим. ред.

## Живой мозг

микроскопическую ткань, сплетенную из соединенных между собой мозговых клеток. Личность, которую мы считаем вами, — это вместе-лище пережитого вами опыта, куда добавлен малый срез пространства и времени. Через свои чувства вы впитали местную культуру и местные технологии. Вы стали тем, кто вы есть, благодаря окружающей вас реальности — в такой же степени, что и заложенной в вас ДНК.

Для контраста обратимся к примеру двух комодских варанов\* — рожденного в наши дни и появившегося на свет 30 тысяч лет назад. Судя по всему, этих двух существ трудно было бы отличить друг от друга, если исходить только из особенностей их поведения.

Тогда в чем разница?

Комодские вараны появляются на свет с мозгом, который каждый раз разворачивается примерно в одну и ту же структуру. Жизненные навыки в их «послужном списке» (Ешь! Спаривайся! Плыви!) по большей части жестко установлены в мозге, что позволяет им удерживать конкретную нишу в экосистеме. Правда, способностью к адаптации они не отличаются. Если комодских варанов перебросить из родных мест обитания в юго-восточной Индонезии в заснеженную Канаду, им тут же придет конец.

В отличие от варанов, человек непривередлив и способен выжить в любом уголке земного шара, а в скором времени мы выйдем и за его пределы. В чем тут фокус? Вовсе не в том, что мы выносимнее, жизнеспособнее или неприхотливее других живых созданий, — тут мы проигрываем почти любому животному. Дело в другом: мы приходим в мир, имея во многом неразвитый мозг. Отсюда и уникально длительный для живой природы период полной беспомощности в детстве. Что, однако, с лихвой окупается, поскольку наш мозг приглашает окружающую реальность поучаствовать в его формировании, — вот почему мы как губка впитываем языки, на котором говорят вокруг, культуру родных мест, моду и манеру одеваться, политические и религиозные представления, наконец, этику и мораль.

Приход в этот мир с незрелым мозгом в случае нашего вида зарекомендовал себя очень выигрышной стратегией. Мы лихо обходим в конкуренции любой другой вид животных: распространились по всей земной суше, покорили моря и океаны, вырвались из земных объятий на Луну. Мы втрое увеличили продолжительность своей жизни. Мы сочиняем симфонии, возводим небоскребы и чем дальше, тем с большей точностью

---

\* Комодский варан (лат. *Varanus komodoensis*) — вид ящериц из семейства варанов (Varanidae), самая большая из ныне существующих ящериц. Прим. ред.

измеряем параметры и показатели нашего мозга. И заметьте: ни одно из подобных начинаний никогда не было генетически закодировано.

Во всяком случае не кодировалось напрямую. Напротив, в генах воплощен простой принцип: *не создавай жестких конструкций, создай систему, способную подстраиваться под окружающий мир*. Наша ДНК не есть жесткая схема построения организма; скорее она закладывает основу динамической системы, которая непрерывно переписывает схемы своих соединений, чтобы лучше отражать окружающую реальность и именно в ней оптимизировать собственный КПД.

\*\*\*

Задумайтесь, как школьник видит политическую карту мира, принимая границы государств и их территории как нечто незыблемое и основополагающее. И совсем другое дело, как видит ту же политическую карту профессиональный историк — кто-кто, а он хорошо понимает, что нынешние государственные границы есть результат стечения исторических обстоятельств и что наша история могла бы сложиться слегка по-другому, вмешайся в нее случай: будущий король мог умереть в детстве, или нас обошла бы эпидемия бубонной чумы, или был бы потоплен военный корабль, что решило бы исход морского сражения в пользу другой стороны. Отдельные незначительные перемены вызвали бы каскад последствий, и в итоге политическая карта мира могла бы приобрести совсем иной вид.

Точно так же воля обстоятельств влияет на структуру мозга. Хотя рисунок в традиционном учебнике наводит на мысль, что нейронывольготно уложены, словно мармеладное драже в банке, и благополучно соседствуют друг с дружкой, не дайте этой картинке запудрить вам мозги: на самом деле нейроны обречены на жесткую конкуренцию за выживание. Подобно народам соседних стран, они отгораживают себе территорию и беспрестанно охраняют ее от посягательств соседей. Конкуренция за территорию и выживание идет на всех уровнях системы: борьбу за ресурсы ведет каждый нейрон и каждое соединение между ними. А поскольку приграничные войны бушуют в мозге на протяжении всей жизни его обладателя, карты тела перерисовываются таким образом, что опыт и цели индивида неизменно отражаются в структуре мозга. Если молоденькая бухгалтерша бросит свои счетоводные книги, чтобы начать карьеру пианистки, ответственный за ее пальцы участок нервной системы расширит свою территорию; если она захочет переквалифицироваться в микроскописта, зрительная зона коры мозга повысит степень разрешения, чтобы девушка лучше различала мельчайшие детали

## Живой мозг

под микроскопом; если же ее прельстит профессия парфюмера, в мозге увеличиваются зоны, ответственные за обоняние. Мозг только для незаинтересованных выглядит застывшим мирком с четкими, раз и навсегда обозначенными границами.

Мозг поддерживает свои активы по степени важности посредством жесткого соревнования всех участвующих частей. Этот базовый принцип поможет пролить свет на ряд вопросов, с которыми мы вскоре столкнемся. Почему иногда вам кажется, что у вас в кармане прожужжал мобильник, хотя он, оказывается, мирно лежит на столе? Почему актер австрийского происхождения Арнольд Шварценеггер изъясняется на американском английском с сильным акцентом, а уроженка Украины Мила Кунис\* — без намека на акцент? Почему ребенок с аутизмом способен собрать кубик Рубика за 49 секунд, но не в состоянии поддержать обычный разговор со сверстником? Сможет ли человек, опираясь на новые технологии, развить новый тип чувств и тем самым способность напрямую воспринимать инфракрасное излучение, глобальные синоптические модели или состояние фондового рынка?

## Не хватает инструмента — создай

В конце 1945 года Япония оказалась в тяжелом положении. В предшествующие 40 лет, пока гремели войны, сначала Русско-японская, потом Первая и Вторая мировая, Токио направлял свои интеллектуальные ресурсы исключительно на военные цели. Благодаря этому страна приобрела плеяду блестящих специалистов, чьи таланты и знания были заточены только под войну. Но атомная бомба и усталость от войн поумерили захватнические аппетиты Токио, прежде устремленные на Азию и Тихоокеанский бассейн. Война кончилась. Мир безвозвратно изменился, а значит, народу Японии поневоле тоже предстояло поменяться.

Необходимость в переменах поставила перед Токио головоломный вопрос: куда девать целую армию военных инженеров, которую с начала века непрестанно выковывали для создания все более совершенных видов оружия? Специалистам военного профиля попросту не находилось места в стране, желавшей теперь мира и спокойствия.

Так, во всяком случае, поначалу представлялось. И что же? В следующие несколько лет Токио решительно видоизменил социально-экономический ландшафт страны, найдя своим инженерам новое применение.

---

\* Мила Кунис (р. 1983) — американская актриса. Прим. ред.

Тысячи работников прошли профессиональную переподготовку, нацеленную на проектирование и строительство сети высокоскоростных железных дорог и пассажирских экспрессов «Синкансэн»<sup>5</sup>. Инженеров-аэродинамиков, прежде занятых в проектировании самолетов военно-морской авиации, перебросили на проектирование вагонов обтекаемой формы для сверхскоростного поезда. Те, кто раньше работал над палубным истребителем Mitsubishi Zero, теперь разрабатывали конструкцию колес, осей и рельсов для обеспечения безопасного движения поездов на сверхскоростях.

Токио перепрофилировал свои ресурсы в соответствии с новой реальностью. Перестроил машиностроение, руководствуясь требованиями дня. Воистину перековал мечи на орала.

То есть проделал ровно то же самое, что проделывает мозг.

Мозг беспрерывно подстраивается под вызовы и цели текущего момента. Он формирует свои ресурсы, добиваясь их соответствия требованиям обстоятельств, в которых в данный момент находится. Если окажется, что мозг не располагает нужным инструментарием, будьте спокойны: он его сотворит.

Чем эта стратегия так хороша для мозга? Разве кто-то усомнится, что созданные человеком технологии чрезвычайно успешны? А между тем при их разработке мы руководствуемся совсем другой стратегией: проектируем машины с жестко заданной конструкцией — «железом», выражаясь языком айтишников, — и программное обеспечение, диктующее им выполнять в точности те операции, которых мы от них требуем. Какие преимущества можно получить, если размыть различия между жесткой и гибкой составляющими, что позволило бы машинам, выполняя свои программы, постоянно реконструироваться?

Скорость — вот что станет первым преимуществом<sup>6</sup>. Вы быстро печатаете на клавиатуре потому, что нет нужды задумываться над подробностями постановки пальцев на клавишах, как и над их целями и задачами. Печатание происходит само собой, как будто по волшебству, потому что данный навык закреплен в вашей нейронной сети. Подобные задачи доводятся до автоматизма благодаря реконфигурации нейронных соединений, что позволяет вам быстро принимать решения и действовать. Миллионы лет эволюции никак не предвещали возникновения письменного языка, не говоря уже о таком приспособлении, как клавиатура, и тем не менее нашему мозгу не составило труда воспользоваться благами этого новшества.

Для сравнения представьте, что пробуете найти нужные клавиши на незнакомом вам музыкальном инструменте. Вам придется

## Живой мозг

задействовать осознанное мышление, как при решении любой задачи в отсутствие нужного навыка, а это процесс сравнительно медленный. Подобное различие в скоростях новичка и профессионала объясняет, почему у футболиста-любителя то и дело отбирают мяч. Опытный на-тренированный футболист, в отличие от любителя, считывает сигналы тела противников, мастерски ведет мяч и без промаха бьет по воротам. Бессознательные действия всегда быстрее тех, что производятся по велению разума. Крестьянин орудует плугом быстрее, чем мечом. А самурай — мечом быстрее, чем плугом. Плугом пахать землю быстрее, чем мечом.

Вторым преимуществом использования машин для решения важных задач станет энергоэффективность. Футболисту-новичку не понять, как перемещения отдельных игроков по полю складываются в единую картину игры, зато профессионал умеет разными способами направлять ее ход к голевой ситуации. Спрашивается, чей мозг работает активнее? Как вы догадываетесь, мозг многоопытного бомбардира\*, потому что ему понятна общая схема игры и его мозг мгновенно просчитывает возможности, решения и сложные маневры. Но ваша догадка неверна. В мозге профессионала уже определенным образом выстроена футбольная схема нейронной сети, что и позволяет ему результативно играть при удивительно малой мозговой активности. В каком-то смысле он растворил границу между игрой и собой, стал одним целым с игрой. А у любителя мозг во время игры возбужден. Он силится оценить, какой маневр важнее, и перебирает множество вариантов оценки ситуации в попытках определить, которая из них верна, если только не все они ложны.

Профессионал, поскольку футбольные премудрости надежно впечатаны в схему его нейронных связей, на поле действует и быстро, и эффективно. Он оптимизировал нейросеть под все, что важно в его мире.

## Система с нон-стоп-переменами

Понятие системы, способной меняться под действием внешних обстоятельств и сохранять свою новую конфигурацию, побудило американского психолога Уильяма Джеймса ввести в оборот термин «пластичность». Пластичный объект — это тот, которому можно придать новую

---

\* Бомбардир — лучший нападающий в футбольной команде, забивающий наибольшее число голов. *Прим. ред.*

конфигурацию, причем он способен сохранять ее. Отсюда, собственно, и пошло название материала, именуемого сегодня пластиком: из него мы штампую ложки-плошки, игрушки, телефонные аппараты, причем благодатный материал отлично сохраняет приданную ему форму, ни при каких обстоятельствах не возвращаясь к своей исходной аморфности. В точности так же обстоят дела и с мозгом: приобретаемый опыт меняет его конфигурацию и перемены надежно сохраняются.

В нейропсихологии мы употребляем термин «пластичность мозга» (или нейропластичность), однако в этой книге я стараюсь нечасто использовать его, поскольку иначе порой рискуешь упустить главное. Случайно или нет, но слово «пластичность» предполагает, что объекту придана определенная форма, с тем чтобы он сохранил ее навечно: если это пластмассовая игрушка, таковой она и останется. С мозгом все иначе — он перестраивается на протяжении всей жизни.

Задумайтесь, как развивается город, и обратите внимание, каким образом он растет, как оптимизирует свои пространства и подстраивается под окружающую реальность. Посмотрите, где организуются стоянки для грузового транспорта и появляются придорожные кафе, как городские власти вырабатывают иммиграционную политику, подстраивают образование и городское законодательство под возникающие по ходу жизни городские нужды. Город не стоит на месте, он всегда в движении. Не бывает так, чтобы проектировщики заранее спланировали его до последнего закоулка, а потом зафиксировали-законсервировали в неподвижности, как пластмассовую игрушку. Город бесконечно меняется.

Вот и мозг, подобно городу, не застывает окончательно. Всю жизнь мы стремимся к чему-то, даже если цели меняются. Представьте, как вас могла бы озадачить ваша же сделанная много лет назад запись в дневнике. Она отражает строй мыслей, мнения и взгляд на мир кого-то, кто слегка отличается от личности, какой вы знаете себя сегодня, а иногда, по сравнению со своей предыдущей личностью, вы изменяетесь до неузнаваемости. Пускай у вас то же имя и вы прожили те же детские годы, но за время, разделяющее написание тех, давних, строчек и их прочтение сегодня, сам их автор изменился.

Конечно, значение термина «пластичный» можно расширить и подтянуть к понятию непрерывного изменения, так что я буду кое-где употреблять его, чтобы сохранить привязку к научной литературе, на которую буду ссылаться<sup>7</sup>. Но, думается, уже прошли времена, когда чудеса отливки пластика завораживали нас. Нынешняя наша цель — понять, как работает живая система мозга, и для этого я ввожу термин, на мой взгляд,

лучше всего отражающий суть: «живая связь». Как мы вскоре убедимся, невозможно рассматривать мозг как объект, разделимый на материальное «железо» (хардвер) и неосязаемые «программы» (софтвер). Вместо хардвера-софтвера обратимся к понятию «живой компонент системы» (по терминологии айтишников — лайфвер, имеется в виду тот, кто оперирует хардвером и софтвером), поскольку оно поможет нам постичь суть этой системы — динамичной, адаптивной и жадной до информации.

\*\*\*

Вернувшись к случаю Мэттью, вы оцените мощные способности мозга к реконфигурации самого себя. После удаления одного полушария Мэттью утратил способность ходить, говорить и к тому же страдал недержанием мочи. Словом, случилось именно то, чего больше всего боялись его несчастные родители.

А потом, благодаря ежедневным сеансам физиотерапии и занятиям с логопедом, мальчик начал заново учиться говорить. Восстановление навыка речи происходило медленно и в такой же последовательности, как в раннем детстве: сначала ребенок научился произносить одно слово, затем два, потом говорить короткими фразами.

Тремя месяцами позже Мэттью практически восстановился — в том смысле, что его уровень развития стал полностью соответствовать возрасту.

Сейчас, через много лет, Мэттью недостаточно хорошо пользуется правой рукой и слегка прихрамывает<sup>8</sup>. А в остальном ведет нормальную жизнь, и по нему почти не скажешь, что на его долю выпало столь тяжкое испытание. У него превосходная долговременная память. Он проучился три семестра в колледже. Правда, из-за трудностей с правой рукой не успевал записывать лекции, поэтому с учебой пришлось расстаться, зато устроился на работу в ресторан. Мэттью отвечает на телефонные звонки, заботливо обслуживает посетителей, подает блюда и берется за все, что ему поручают. Окружающие и не подозревают, что у него только половинка мозга. Как выражается Валери, «кто не знает, никогда и не заподозрит».

Как это возможно, что хирургическое удаление такой крупной части мозга никак себя не проявляет? А вот как: оставшаяся часть динамически перемонтировала свои нейронные связи, чтобы взять на себя функции отсутствующего полушария. Первоначальные схемы нейронной сети приспособились, чтобы поместиться в меньшем пространстве и сосредоточивать в себе все функции正常ной жизни, располагая лишь половиной прежнего «оборудования». Из смартфона нельзя выкинуть

половину электронной начинки и рассчитывать, что он по-прежнему будет посыпать и принимать звонки, ибо хардвер — штука тонкая и уязвимая. Лайфверу все напочем, он прочный и стойкий.

\*\*\*

В 1596 году фламандский картограф Авраам Ортелий как-то разглядывал карту мира, и вдруг его озарило: контуры обеих Америк и Африки со стороны Атлантического океана удивительно подходили друг к другу, как фрагменты пазла. Их явно можно было совместить, хотя картограф не имел представления, какая сила могла разъединить их, растасив в стороны. В 1921 году немецкий геофизик Альфред Вегенер выдвинул гипотезу материкового дрейфа: вопреки представлениям, что материки неподвижны и их взаимное расположение незыблемо, они, судя по всему, дрейфуют, словно исполнинские кувшинки. Дрейф материков происходит микроскопическими темпами (примерно теми же, какими у вас растут ногти), но если бы мы сумели снять фильм продолжительностью в миллионы лет, то увидели бы материковую сущу как часть динамической текучей системы, которая меняется, повинуясь законам распределения тепла и давления.

Подобно земному шару, мозг тоже представляет собой динамическую текучую систему. Но каким законам она подчиняется? Число научных статей о нейропластичности перевалило за сотни тысяч. Но и сегодня, взирая на эту таинственную розоватую самонастраивающуюся материю, мы не знаем всеобщих основ, которые подсказали бы нам, почему и как мозг творит свои чудеса. Данная книга в целом обрисовывает эти основы, что позволит нам лучше понять, кто мы, как стали такими и куда идем.

Раз уж мы переключились на образ мышления в категориях живой нейронной сети, следует признать, что нынешние машины с жестко заданной конструкцией безнадежно бесполезны для нас в будущем. В самом деле, традиционное проектирование машин и механизмов предполагает тщательную проработку всех важных конструктивных элементов. Автостроительная компания, например, при модернизации ходовой части автомобиля долгие месяцы проектирует двигатель, который бы в точности отвечал новым параметрам. А теперь представьте, что вы спроектировали автомобилю новый кузов по собственному усмотрению, а двигатель самостоятельно, без вашего участия, под этот кузов подстраивается. Как мы увидим далее, стоит нам понять принципы построения живой нейронной сети, и мы обратим себе на пользу гений Матери-природы при создании новых машин, которые сами гибко определят,

## Живой мозг

какой быть схеме их соединений, посредством самооптимизации под характер вводных данных и обучения на накопленном опыте.

Самое волнующее в жизни — не то, кто мы есть сейчас, а трепетное ожидание новой личности, которая постоянно подспудно вызревает в нас. Так и колдовство мозга кроется не в его элементах, а в том, как эти элементы каждый миг по-новому свиваются-перевиваются, образуя динамичную, наэлектризованную живую ткань.

Даже несколько страничек, которые вы сейчас прочитали, и те изменили ваш мозг: заполняющие их печатные символы стронули лавину из миллионов микроперемен в бескрайних лесах ваших нейронных связей, вылепив новую личность, чуточку отличную от той, какой вы были в начале главы.

# ГЛАВА 2

## ПРОСТО ДОБАВЬ РЕАЛЬНОСТИ

### Как вырастить хороший мозг

Мозг является в мир не чистым листом — он приходит уже экипированным под определенные ожидания. Возьмем, например, цыпленка: вылупившись из яйца, он уже через несколько минут ковыляет на маленьких, неверных пока ножках и даже умеет неуклюже бегать, а если что, может и затаиться. Среда обитания не позволяет цыпленку потратить месяцы на выработку навыков передвижения.

Точно так же и младенцы приходят в мир, уже располагая набором предустановленных программ. Возьмем хотя бы тот факт, что мы уже при рождении оборудованы всем необходимым, чтобы научиться говорить. Или что, глядя на показывающего язык взрослого, младенец способен проделать то же самое, хотя это и требует изощренной способности переводить зрительные впечатления в моторный акт<sup>1</sup>. Или что волокнам глазного нерва не надо учиться находить свои цели в глубинах мозга; они просто следуют подсказкам сигнальных молекул\* и попадают куда следует — и так происходит всякий раз. За эти жесткие схемы можно сказать спасибо нашим генам. Но генетически обусловленных связей для создания таких схем недостаточно, особенно у человека. Система организована очень сложно, а генов не так уж много. Даже если учитывать «перетасовки, нарезки и склейки»\*\*, которые делают возможным появление множества разновидностей одного и того же гена, число нейронов и нейронных связей во много раз превышает число генных сочетаний.

В целом уже известно, что в конкретизации схем нейронной сети мозга существует не только генетика. Ученые еще пару веков назад

\* Сигнальные молекулы — это различные химические вещества, способные передавать внутрь клетки сигналы из внешней среды и внутренней среды организма. *Прим. ред.*

\*\* Возможно, автор имеет в виду процессы сплайсинга, когда из базовой матричной РНК в разных условиях вырезаются разные участки и производятся разные белки, или сайленсинга, при котором экспрессия гена может быть подавлена. *Прим. науч. ред.*

## Живой мозг

догадывались о чем-то подобном и правильно предположили, что существенную роль должны играть особенности чувственного опыта. В 1815 году физиолог Иоганн Шпурцгейм допустил, что мозг, подобно мышцам, тоже можно развить упражнениями: его идея состояла в том, что кровь переносит питательные вещества для роста и «обильнее снабжает ими возбужденные участки»<sup>2</sup>. В 1874 году Чарлз Дарвин заинтересовался, можно ли, опираясь на идею Шпурцгейма, объяснить, почему у кроликов в дикой природе размеры мозга больше, чем у их одомашненных собратьев. Дарвин предположил, что животные в природе вынуждены больше использовать смекалку и полагаться на чувства, чем одомашненные кролики; соответственно подстроились и размеры мозга<sup>3</sup>.

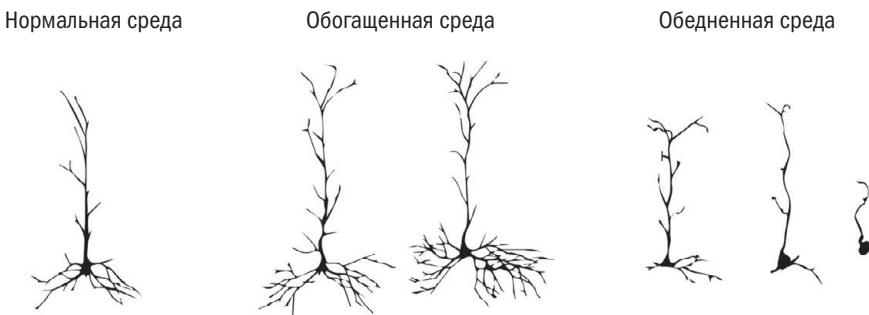


Рис. 2.1. В норме нейрон разрастается, будто ветвистое дерево, благодаря чему может соединяться с другими нейронами. В обогащенной среде отростки нейрона разрастаются гуще и ветвятся обильнее, в обедненной среде они чахлы и скохшились

В 1960-х годах ученые всерьез заинтересовались, появляются ли в мозге заметные измеримые изменения в результате получения опыта. Самым простым было выращивать лабораторных крыс в разных средах: например, в обогащенной, где присутствуют разнообразные игрушки и беговые колеса, или в обедненной — проще говоря, в одиночной пустой клетке<sup>4</sup>. Результаты опытов поражали: среда жизни меняла структуру крысиных мозгов, к тому же выявилась корреляция между структурой мозга и способностью зверьков к обучению и запоминанию. Выращенные в обогащенной среде крысы лучше справлялись с задачами, а при аутопсии\* у них обнаружились буйные заросли длиннющих дендритов (похожие на ветви отростки, отходящие от тела клетки)<sup>5</sup>. В то же время

\* Аутопсия — патологоанатомическая или судебно-медицинская процедура, посмертное вскрытие и исследование тела, в том числе внутренних органов. Обычно производится для установления причины смерти. Прим. ред.

у крыс, выросших в обедненных условиях, обучаемость была слабой, а нейроны аномально сморщенными. Точно такой же эффект внешней среды обнаружен у птиц, обезьян и других млекопитающих<sup>6</sup>. Внешняя среда имеет большое значение для мозга (рис. 2.1).

Происходит ли подобное с человеческим мозгом? В начале 1990-х калифорнийские ученые додумались воспользоваться возможностями аутопсии при сопоставлении мозга людей, получивших только школьное образование, и выпускников колледжей. Как и при исследовании лабораторных животных, обнаружилось, что у людей с высшим образованием область, ответственная за понимание устной и письменной речи, содержит более ветвистые и густые заросли дендритов<sup>7</sup>.

Таким образом, первый урок заключается в том, что микроструктура мозга отражает особенности среды, воздействию которой он подвергается. И относится это не только к дендритам. Вскоре мы узнаем, что опыт общения с миром модулирует почти все измеримые элементы мозга, начиная с молекулярного уровня и заканчивая общим анатомическим строением.

## Без опыта — никуда

Почему Эйнштейн стал Эйнштейном? Генетика определенно сыграла в этом свою роль, однако в наши учебники по истории он попал благодаря каждой частице опыта, какой ему довелось получить: музыкальная среда и звуки виолончелей, учитель физики в старшем классе, отказ любимой девушки, патентное бюро, где он работал, математические задачи, за блестящее решение которых его превозносили, книги, которые он читал, равно как и миллионы фрагментов последующего опыта, — все это в совокупности позволило его нервной системе сформировать биологическую систему, которую мы называем Альбертом Эйнштейном. Каждый год в мир приходят тысячи детей с задатками не хуже, чем у него, однако воздействия внешней среды — культуры, экономических условий, состава семьи — не дают им достаточной положительной обратной связи. И Эйнштейны из них не вырастают.

Если бы все решала только ДНК, отпал бы практический смысл в построении целенаправленных социальных программ, призванных прививать детям положительный опыт и ограждать их от опыта разрушительного. Но мозгу, чтобы правильно развиваться, требуется правильная внешняя среда. Один из больших сюрпризов преподнес нам проект «Геном человека»: когда на рубеже нового тысячелетия ученые вчерне

## Живой мозг

составили структуру генома, оказалось, что у человека имеется все-го-навсего около 20 тысяч генов<sup>8</sup>. Такого биологи не ожидали: они-то предполагали, что генов у человека должно быть никак не меньше сотен тысяч, учитывая невероятную сложность устройства мозга и организма в целом.

Тогда каким же образом невероятно сложно устроенный мозг, насчитывающий 86 млрд одних только нейронов, умудряется выстраивать себя на основе простейшего «букваря»? Ответ строится на применяемой геномом остроумной стратегии: его дело — выточить болванку и предоставить опыту общения с миром доводить ее до ума. Словом, мозг человека при рождении поразительно не завершен, и для его развития требуется взаимодействие с окружающим миром.

Рассмотрим цикл сна и бодрствования. Его регулируют внутренние часы организма, называемые *циркадным ритмом*, который настроен примерно на 24-часовой цикл. Если же вы на несколько суток спуститесь в пещеру, куда не проникает дневной свет, возвещающий время суток, ваш циркадный ритм сместится в диапазон 21–27 часов. Здесь нам открывается придуманное мозгом простое решение: приблизительно задать основу биологических часов, а дальше пускай они сами подстраиваются под суточный цикл солнца. Такой изящный трюк избавляет нас от необходимости генетически кодировать внутренние часы с идеально точным ходом — пускай мир сам вращает их шестеренки как полагается.

Поскольку мозг обладает гибкостью, события вашей жизни впечатываются напрямую в его нервную ткань. Эта грандиозная выдумка Матушки-природы позволяет нам учить языки, ездить на велосипеде, постигать премудрости квантовой физики — и вся наша способность обучаться новому прорастает из зернышек весьма скромного набора генов. ДНК не план и не проект, а лишь первая костяшка домино, которая дает начало всему шоу нашего становления.

С этих позиций легко понять, почему ряд самых распространенных нарушений зрения (скажем, неспособность корректно воспринимать глубину) развиваются из-за разбалансировки в паттернах активности, передаваемых в зрительную кору от одного и другого глаза. Например, у детей с врожденным сходящимся или расходящимся косоглазием работа глаз не может быть скоординирована (как было бы при правильном расположении глазных (зрительных) осей). Без лечения у ребенка не разовьется нормальное стереоскопическое зрение, то есть способность четко воспринимать размеры, формы и расстояния, несмотря на легкие различия в изображениях, поступающих от каждого глаза. Один глаз

будет постепенно слабеть вплоть до слепоты. Ниже мы разберемся, почему такое происходит и как это исправить. А пока уясним важный момент: развитие нормальной зрительной системы зависит от нормального притока зрительных импульсов — иными словами, зависит от опыта.

Таким образом, генетические инструкции играют лишь малую роль в деталях формирования кортикальных связей. Иначе и быть не может: разве каких-то 20 тысяч генов хватит, чтобы в деталях прописать 200 триллионов соединений между нейронами? Такая сверхсложная модель никогда бы не сработала. Напротив, чтобы нейронные сети normally развивались, им требуется взаимодействовать с реальностью<sup>9</sup>.

## Смелая авантюра природы

29 сентября 1812 года на свет появился младенец, которому предстояло унаследовать престол Великого герцогства Баден. Но, увы, через 17 дней он скончался. На том его коротенькая история и закончилась.

Или не закончилась? Спустя 16 лет в Нюрнберге объявился странный юноша, называвший себя Каспаром Хаузером. При нем имелась записка, где значилось, что он был брошен в детстве. Сам юноша явно не умел говорить, а только твердил две-три фразы, включая такую: «Хочу быть кавалеристом, как мой отец». Чудной найденыш вызывал всеобщий интерес в городе, им заинтересовались и городские верхи; поползли слухи, что он и есть наследный принц Бадена, просто в первые дни жизни его подменили умирающим младенцем нечестивые заговорщики, мешавшие на баденский престол.

Впрочем, история найденыша приобрела широкую известность и помимо дворцовых интриг: в Каспарт видели классический пример ребенка-дикаря. Как следовало из его сбивчивых речей, все детство он провел в одиночестве, заточенный в тесную подземную каморку, куда не проникал дневной свет. Темница имела метр в ширину, два в длину и полтора в высоту. Помимо убогого соломенного ложа обстановку составляла лишь детская деревянная лошадка. Просыпаясь поутру, Каспар всякий день находил в своем обиталище немного хлеба и воды; другой пищи он не знал. И никогда не видел, чтобы кто-то входил в его каморку или выходил из нее. Временами ему оставляли воду не совсем такого вкуса, как обычно, и, попив ее, он погружался в сон, а проснувшись, замечал, что у него подстрижены волосы и ногти. За все время заточения у него не было прямого контакта с другими людьми. Человек, который обучал его письму, всегда закрывал лицо, так что юноша не мог бы его узнать.

История Каспара Хаузера приковала к себе внимание мира. Мальчик вырос, научился четко выражать свои мысли и позже с обильными трогательными подробностями описывал в автобиографии свое несчастное детство. Его необычная судьба и сегодня живет в пьесах, книгах и музыке; возможно, Каспар — самый знаменитый в истории найденыш-маугли.

Однако рассказы Каспара почти наверняка были выдумками. Помимо обширных исторических исследований, исключивших достоверность его повествования, тому имеются и причины нейробиологического свойства: не смог бы ребенок, выросший в отрыве от людей, выучиться ходить, говорить, писать, выступать на публике и жить благополучной жизнью, как это произошло с Каспарам. Средства массовой информации почти сотню лет муссировали его историю, пока Карл Леонгард\* не поставил в ней жирную точку, без всяких эквилибристов высказавшихся по существу дела:

«Живи Каспар с детства в описываемых им условиях, в умственном развитии он не ушел бы дальше клинического идиота и, безусловно, вряд ли смог прожить долго. Его рассказы настолько изобилиуют нелепицами, что остается только удивляться, почему столь многие в них поверили и по сей день продолжают верить»<sup>10</sup>.

В конце концов, хотя роль генетических программ неоспорима, Мать-природа устроила так, что мозг в своем развитии опирается на получение обширного разностороннего жизненного опыта, включая социальные взаимодействия, разговоры, игры, внешние воздействия и все прочее, из чего складывается ландшафт нормального человеческого общения. Стратегия взаимодействия с миром дает колоссальной системе мозга возможность формироваться при участии достаточно скромного набора «прописей». Это весьма изобретательный подход к распаковке мозга (и всего организма) из одной микроскопической яйцеклетки.

И все же в такой стратегии присутствует элемент авантюризма. Она сопряжена с некоторым риском, ведь работа по формированию мозга частично перепоручается опыту общения с миром, а не жестко предустановленным схемам. А вдруг младенец повторит несчастную судьбу Каспара и проведет детство, совершившись заброшенный родителями?

---

\* Карл Леонгард (1904–1988) — немецкий психиатр. Разработал одну из первых типологий характеров, введя в науку концепцию акцентуированных личностей. Прим. ред.

К большому прискорбию, ответ нам известен. Вот пример: в июле 2005 года полиция Плант-сити прибыла для проведения расследования к покосившемуся домишке. Полицейских насторожило сообщение соседа: тот несколько раз замечал в одном из окон дома маленькую девочку, но ни разу не видел, чтобы она выходила на улицу, как никогда не видел рядом с ней никого из взрослых.

Полицейские несколько раз стучали в дверь, и в конце концов им открыла женщина. Ей сообщили, что выписан ордер на обыск дома для поисков ее дочери. Полицейские вошли в дом, прошли по коридорам, осмотрели несколько комнат и наконец заглянули в тесную комнатушку. Там и находилась девочка (рис. 2.2). Одну из женщин-полицейских затошило.



Рис. 2.2. Даниэль, дикий ребенок, найденный в 2005 году во Флориде. Хотя по фото видно, какое у девочки красивое лицо, в ее поведении и проявлениях отсутствует что-либо присущее нормальному человеческому общению: она пропустила критически важное для развития временное окно, когда ей следовало бы получить от мира должный приток впечатлений и опыта

Даниэль Крокетт, девочка с явными признаками задержки роста для своих почти семи лет, провела все детство взаперти, в темной каморке размерами со шкаф. Тело ребенка сплошь покрывала короста из фекалий и тараканьих экскрементов: об удовлетворении элементарных необходимых потребностей с чьей-либо помощью и речи не шло. Она не знала родительской ласки, никто никогда не говорил с ней нормальным языком, к тому же ее ни разу в жизни не выпускали на воздух. Девочка совершенно не умела разговаривать. При встрече с сотрудниками полиции

(а позже с социальными работниками и психологами) она смотрела как будто сквозь них, не выказывала никаких проблесков осознания того, что к ней обращаются, или признаков понимания, что такое нормальное человеческое общение. Даниэль не умела пережевывать твердую пищу, не знала, как пользоваться туалетом, как выразить согласие кивком или в знак отрицания помотать головой, а спустя год все еще не освоила кружку-поильник. После многочисленных обследований и тестов врачи исключили наличие у девочки генетических расстройств, в том числе коркового паралича, аутизма и синдрома Дауна. Напротив, нормальное развитие ее мозга было нарушено жестокой социальной депривацией (невозможностью общаться с другими людьми).

Несмотря на все старания врачей и социальных работников, перспективы у Даниэль безрадостные: скорее всего, она проведет свои дни в интернате для инвалидов и, может быть, в конце концов научится обходиться без подгузников<sup>11</sup>. Сердце разрывается от мысли, что на долю бедняжке досталось реальное, а не выдуманное каспар-хаузеровское детство с реальными тяжелейшими последствиями.

Почему последствия изоляции оказались для Даниэль столь ужасными? Дело в том, что человеческий мозг является на свет недозавершенным. Для правильного развития ему требуется должный поток входящей информации от мира. Мозг впитывает опыт общения с миром для распаковки заложенных в нем программ, только пока открыто временное окно. А этот период очень недолог, и, если мозг вовремя не воспользовался им, снова открыть окно трудно или даже невозможно.

В трагедии Даниэль просматривается параллель с экспериментами на животных, с начала 1970-х годов проводимыми в Висконсинском университете психологом Гарри Харлоу: он изучал на обезьянах узы между матерью и детенышами. Карьера шла в гору, но в 1971 году его жена умерла от рака и Харлоу погрузился в депрессию. Он продолжал научную работу, но коллеги и друзья чувствовали, что Гарри уже не тот, каким был прежде. В тот период Харлоу переключил свои научные интересы на изучение депрессии.

Для моделирования клинической депрессии человека он использовал макак-резусов, изучая на них воздействие изоляции. Он помещал детенышей в глухую стальную клетку и наблюдал за ними через зеркало Гезелла\*, которое позволяло ему смотреть внутрь, но не давало детенышу

\* Зеркало Гезелла — стекло, которое с одной стороны выглядит как зеркало, а с другой как прозрачное стекло. Позволяет экспериментатору наблюдать за кем-то, оставаясь незамеченным. Для психологического эксперимента его впервые применил американский психолог А. Гезелл. *Прим. науч. ред.*

возможности смотреть наружу. Одного Харлоу пробовал держать в запертой клетке 30 дней. Другой находился в изоляции в течение полуго-да, а еще несколько — целый год.

Лишенные возможности развить нормальные социальные связи детеныши макаки-резуса (Харлоу помещал их в «карцер» вскоре после рождения) вырастали с глубоко укоренившимися нарушениями. Те, что про-жили в изоляции дольше остальных, заканчивали примерно как Даниэль: не умели общаться с сородичами, не принимали участия в отдыке и играх, кооперации или соперничестве. Они еле-еле двигались, а двое перестали принимать пищу.

Харлоу отмечал также, что его подопытные не способны к нормальным сексуальным отношениям. Однако он все равно произвел нескольким выросшим в изоляции самкам искусственное оплодотворение, чтобы посмотреть, как эти психологически ущербные мамашы будут обращаться с собственным потомством. Результат был ужасен: самки выказали полную неспособность нянчить и расти детенышей. В лучшем случае они просто не обращали на них внимания, в худших — на-носили им увечья<sup>12</sup>.

Из экспериментов Харлоу на макаках-резусах можно извлечь те же уроки, что и из бесчеловечного обращения с девочкой Даниэль: стратегия, избранная Матушкой-природой для распаковки новорожденного мозга, опирается на соответствующий опыт взаимодействия с реальностью. Без такого опыта мозг вырастает недоразвитым и болезненным. Как дереву для пышности кроны требуется богатая питательными ве-ществами почва, так и мозгу необходима среда, богатая социальным и сенсорным взаимодействием.

\*\*\*

Познакомившись с основами, мы видим, что мозг для придания себе должной формы использует окружающую его среду. Но как именно мозг впитывает опыт и впечатления мира, если учитывать, что он заключен в темнице черепа? Что происходит с мозгом, когда человек теряет руку или слух? Правда ли, что у незрячего обостряется слух? И какое отно-шение все это имеет к ответу на вопрос, почему нам снятся сны.

# ГЛАВА 3

## ВНУТРЕННЕЕ КАК ЗЕРКАЛО ВНЕШНЕГО

### Дело обезьянок из Сильвер-Спринг

В 1951 году нейрохирург Уайлдер Пенфилд\* опустил кончик тонкого электрода внутрь мозга оперируемого пациента<sup>1</sup> и обнаружил удивительное явление в мозговой ткани, ровно под той полоской кожи на голове, куда приходилась дуга надетых наушников. Когда Пенфилд стимулировал определенную точку в этом участке коры слабым электрическим разрядом, у пациента возникало ощущение, что кто-то дотронулся до его руки. При стимуляции рядом расположенного участка пациент ощущал прикосновение к туловищу. А другой участок, получив электрический разряд, вызывал у пациента ощущение, что дотронулись до его колена. Дальше выяснилось, что каждая область тела представлена в этой области мозга соответствующей чувствительной точкой.

Позже Пенфилду открылись новые глубины обнаруженного им явления: участки мозга, отвечающие за чувствительность прилежащих частей тела, тоже располагаются в коре мозга по соседству. Кисть руки представлена по соседству с предплечьем, предплечье — по соседству с локтем, а отвечающий за локоть участок соседствует с тем, который отвечает за плечо. И так далее. Словом, вдоль этой полоски мозговой ткани располагается подробная топографическая карта тела. Медленно двигаясь вдоль соматосенсорной коры, Пенфилд мог получить карту всего тела человека<sup>2</sup>.

---

\* Уайлдер Пенфилд (1891–1976) — канадский нейрохирург. Вместе с другими исследованиями разрабатывал методы хирургического лечения эпилепсии, а затем использовал полученные результаты для исследования структуры мозга и его функциональной организации. Прим. ред.

Более того: он нашел еще одну кортикалную карту. Выяснилось, что при последовательной стимуляции участков, расположенных вдоль двигательной (моторной) коры (область непосредственно перед соматосенсорной корой), результат был примерно тем же: слабый разряд тока заставлял сокращаться мышцы в конкретных расположенных по соседству участках тела. Причем представительства прилежащих участков тела в двигательной коре повторяли их расположение в соматосенсорной коре (рис. 3.1).

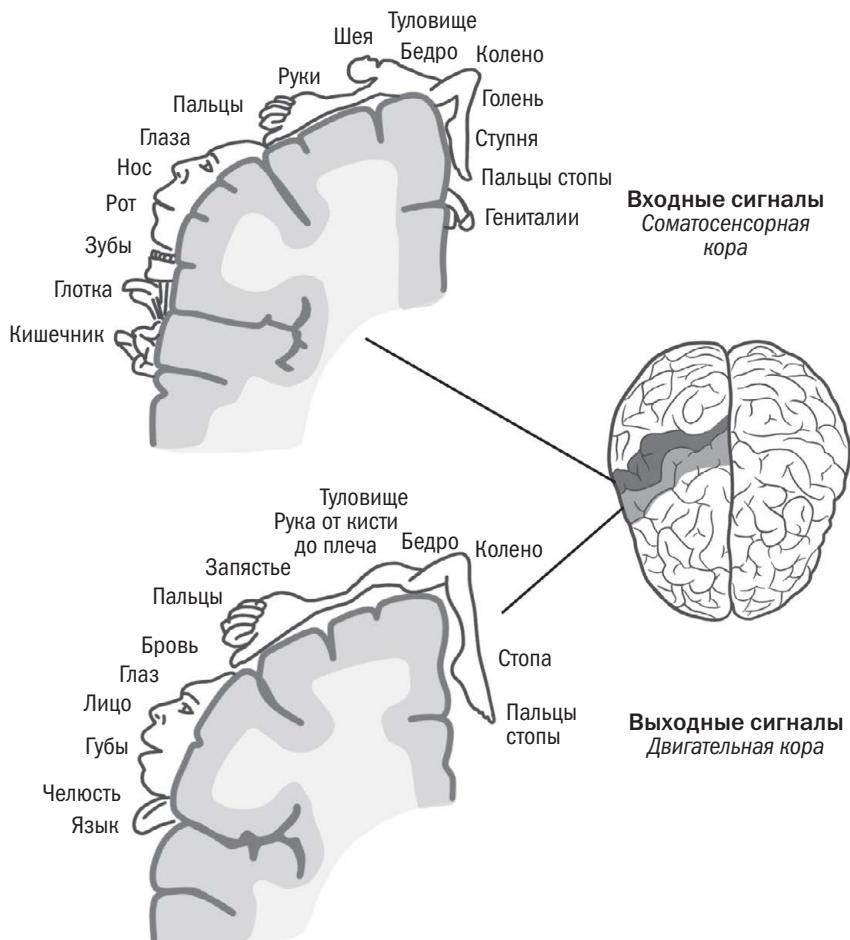


Рис. 3.1. Карты тела обнаружены в тех участках коры, куда поступают входные сигналы (соматосенсорная кора, вверху), откуда исходят ответные сигналы (двигательная кора, внизу). Частям тела с более высокой чувствительностью или более тонким управлением соответствуют большие области коры

Пенфилд назвал эти карты тела гомункулусом\*.

Разве можно ожидать, что в мозге имеются подобные карты тела? Не странно ли это? Как они вообще там существуют, ведь мозг заключен в черепе, причем в полной темноте? Примерно 1,3 кг мозговой ткани не могут знать, как выглядит ваше тело; мозг лишен возможности напрямую видеть его. У мозга есть доступ лишь к потокам электрических импульсов, которые стремительно проносятся по густым сплетениям информационных кабелей, называемых в обиходе нервами, он, по идеи, не может иметь представления, какие конечности, в каких местах и в каком порядке присоединяются к туловищу. Но тогда откуда в абсолютной темноте под сводами черепа берется карта схемы тела?

Небольшое умственное усилие тут же подскажет вам, как просто открывается этот ларчик: схема тела наверняка генетически заложена в коре мозга. Отличная догадка!

Но только неправильная. Все обстоит с точностью до наоборот: разгадка бесподобно изящна и дьявольски хитроумна.

\*\*\*

Ключик к тайнам карты тела нашелся спустя десятилетия, и то в силу непредвиденного стечения обстоятельств. Научный сотрудник Института поведенческих исследований в Сильвер-Спринг Эдвард Тауб изучал возможности восстановления двигательной активности после тяжелых мозговых повреждений. В ходе экспериментов на 17 обезьянах (макаках) он планировал определить, возможна ли регенерация поврежденных нервов. Каждому животному Эдвард аккуратно перерезал чувствительные нервы, связывающие мозг с одной из конечностей. Как он и ожидал, подопытные животные теряли чувствительность в «отключенной» конечности. Тауб приступил к исследованиям с целью выяснить, существуют ли способы восстановить пользование бездействующей конечностью.

В 1981 году в лаборатории Тауба начал работать молодой волонтер Алекс Пачеко. Он представился студентом, которого якобы весьма интересовала исследуемая Таубом научная проблематика, а на самом деле был лазутчиком и действовал в интересах набиравшей обороты некоммерческой организации «Люди за этичное отношение к животным» (англ. PETA: People for the Ethical Treatment of Animals), сооснователем которой являлся. По ночам Пачеко фотографировал подопытных макак. Некоторые его фото носили явно постановочный характер и преувеличивали

---

\* Гомункулус — в представлении средневековых алхимиков существо, подобное человеку, которое можно получить искусственным путем. *Прим. ред.*

страдания животных<sup>3</sup>, но, как бы там ни было, желаемого эффекта он добился. В 1981 году полиция округа Монтгомери провела рейд в лабораторию и закрыла ее на основании жестокого обращения с животными. Доктору Таубу предъявили обвинение по шести пунктам в неоказании должной ветеринарной помощи. В ходе апелляции все обвинения были сняты, но тем не менее события в Сильвер-Спринг привели к тому, что в 1985 году был принят Закон о благополучии животных (Animal Welfare Act), в котором конгресс США прописал новые правила содержания животных в исследовательских лабораториях.

Хотя эта история стала поворотным пунктом в защите прав животных, ее значение не ограничивается баталиями в стенах конгресса. В нашем контексте нас прежде всего интересует, что потом происходило с теми семнадцатью травмированными обезьянками. По следам полицейского рейда в лабораторию набежали активисты PETA и унесли зверьков с собой, что дало повод к обвинениям в краже вещественных доказательств по делу. Разгневанные сотрудники института потребовали вернуть животных. Судебные страсти разгорались все жарче, пока спор о владении подопытными обезьянами не достиг высшей судебной инстанции — Верховного суда США.

Верховный суд отклонил прошение PETA вернуть обезьян и передал опекунство над ними третьей стороне — национальным институтам здравоохранения. Пока «старшие братья» пререкались в залах суда за тридевять земель от Сильвер-Спринг, обезьянки-инвалиды наслаждались досрочной отставкой и беззаботно предавались радостям жизни: ели, пили и играли друг с другом. Так пролетели десять лет.

Под конец эпопеи одна обезьянка неизлечимо заболела. Суд дал согласие на усыпление. Тут-то в сюжете и произошел важный поворот. Группа нейробиологов обратилась к суду с предложением: нанесенное животному жестокоеувечье можно будет хоть как-то оправдать, если ученым дадут разрешение перед эвтаназией провести под наркозом картирование мозга животного. После некоторых дебатов суд пошел им навстречу.

14 января 1990 года исследователи поместили регистрирующие электроды в соматосенсорную кору обезьянки. Далее они проделали то же самое, что в свое время Уайлдер Пенфилд на мозге пациента-человека: по очереди дотрагивались до кисти, локтя, мордочки и прочих частей тела животного и фиксировали реакцию нейронов мозга. Таким путем была описана карта тела обезьянки, существующая в коре ее мозга.

Полученные результаты вызвали большой переполох в нейробиологическом сообществе. Оказалось, что карта тела с годами претерпела изменения. То, что от легкого прикосновения к обездвиженной из-за

перерезанных нервов конечности животного больше не активировался соответствующий участок коры, сюрпризом не стало: этого и следовало ожидать. Ученых поразило другое: крошечный участок коры, прежде отвечающий за руку, теперь возбуждался в ответ на прикосновение к мордочке<sup>4</sup>. Иными словами, карта тела перестроилась. Гомункулус все еще выглядел как обезьянка, но обезьянка без правой лапы.

Открытие исключило всякую возможность, что отображаемая в мозге карта тела задана генетически. Напротив, выяснилось, что все обстоит намного любопытнее: карта тела в мозге гибко определялась активными входными сигналами от тела. Когда структура тела меняется, соответственно меняется и кортикальный гомункулус.

В том же году нейробиологи провели аналогичные исследования по мозговому картированию других обезьян из Сильвер-Спринг. В каждом случае обнаружилась значительная перестройка соматосенсорной коры: оказалось, что ее участки, ответственные за «отключенные» конечности, перехвачены прилежащими участками, и гомункулус каждой обезьяны перестроился под новый план ее тела<sup>5</sup>.

Какие ощущения возникают, когда мозг подобным образом сам себя реорганизует? К сожалению, обезьяны не могут рассказать об этом. Зато могут люди.

## Вице-адмирал Горацио Нельсон и посмертная жизнь его правой руки

Командующий британским флотом вице-адмирал Горацио Нельсон (1758–1805), прославленный герой нации, вознесен на пьедестал, с высоты которого взирает на Трафальгарскую площадь<sup>6</sup>. Величественная статуя на коринфской колонне высотой 46 м — дань признанию его заслуг как вдохновенного человечного военачальника, искусного тактика и гения военной изобретательности. Перечисленные качества помогли Нельсону одержать немало решающих побед на морях и океанах от обеих Америк до Нила и Копенгагена. Он героически пал в решающем морском сражении при мысе Трафальгар, которое стало одной из величайших в истории Великобритании морских побед.

Вдобавок к военно-морским подвигам вице-адмирал Нельсон в некотором роде помог нейрофизиологии. Правда, исключительно волей прихотливого случая. Его пути пересеклись с нейробиологией при штурме гавани Санта-Крус-де-Тенерифе. За час до полуночи 24 июля 1797 года пуля вылетела из ствола испанского мушкета с начальной скоростью

около 305 м/с и завершила стремительный полет в правой руке Нельсона, раздробив кость. Пасынок адмирала тugo перетянул рану шарфом, чтобы остановить хлеставшую кровь, а гребцы шлюпки (Нельсон лично возглавлял вылазку в гавань) налегли на весла, чтобы поскорее доставить раненого на флагманский корабль, где в страшном беспокойстве его поджидал врач. После быстрого медицинского осмотра врач с облегчением сообщил, что у Нельсона хорошие шансы выжить, однако следом шла плохая новость: ввиду риска гангрены руку следовало ампутировать. Сказано — сделано. Нельсону тут же провели операцию, отхватив часть руки выше локтя, а ампутированная конечность последовала за борт.

В следующие недели Нельсон учился обходиться без правой руки — во время еды, умывания и даже стрельбы. Он даже стал в шутку называть кулью «мой плавник».

По прошествии нескольких месяцев Нельсон вдруг стал замечать за собой некую странность. Адмирал чувствовал — в буквальном смысле чувствовал, — что у него по-прежнему есть правая рука. Он испытывал ощущения, как будто идущие от ампутированной конечности. И мог поклясться, что чувствует, как сжимает отсутствующую правую руку в кулак и ногти отсутствующих пальцев больно вонзаются в отсутствующую правую ладонь (рис. 3.2).

Нельсон истолковал неведомо откуда взявшуюся чувствительность фантомной руки в оптимистическом духе: он считал, будто обладает неопровергимым доказательством, что жизнь есть и после смерти. В самом деле, если правая рука, которой у него нет, способна вызывать явственное ощущение своего присутствия — как вечный призрак самой себя, — так же должно ощущаться и отсутствующее тело.

Горацио Нельсон не единственный испытывал эти странные ощущения. Спустя годы доктор Сайлас Уир Митчелл по другую сторону Атлантики фиксировал в одном из госпиталей Филадельфии точно такие же фантомные ощущения у многих раненых, лишившихся конечностей на полях Гражданской войны. Его сильно интриговал тот факт, что многие раненые прямо-таки настаивали, что чувствуют свои ампутированные конечности, как будто те по-прежнему на месте<sup>7</sup>. Служило ли это подтверждением идеи Нельсона о телесном бессмертии?

Как потом выяснилось, адмирал слегка поспешил с выводами. Мозг перестраивал карту его тела под его новый план в точности так же, как это происходило у обезьянок из Сильвер-Спринг. Со временем нейробиологи по примеру историков, которые десятилетиями наблюдали, как раздвигаются границы Британской империи, научились отслеживать сдвиги границ в человеческом мозге<sup>8</sup>.

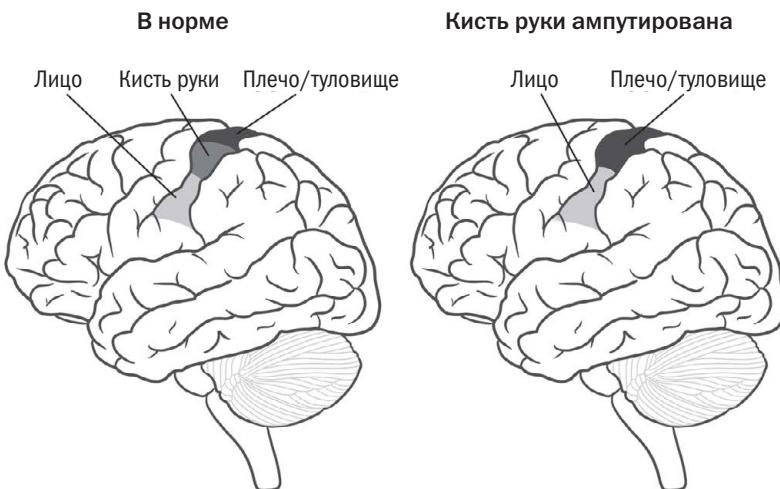


Рис. 3.2. В музеях Британии во множестве представлены живописные и скульптурные изображения адмирала Горацио Нельсона, но мало кто из посетителей замечает, что у героя нет правой руки. После ампутации в 1797 году у Нельсона наблюдался один из первых случаев фантомной чувствительности ампутированной конечности, что навело его на любопытную, хотя и ошибочную метафизическую интерпретацию сего необычного явления

При современных технологиях визуализации можно видеть, что, когда человеку ампутируют кисть руки, территорию ее кортикального представительства забирают соседние представительства. В этом случае, как показано на рис. 3.3, с кортикальными представительствами кисти и предплечья соседствуют те, что отвечают за плечо и лицо. Как и в случае с обезьянами, кортикальные карты преобразуются, чтобы отобразить изменения в плане тела.

Но во всем этом скрыта еще одна тайна. Почему Нельсон продолжал чувствовать руку, когда ее уже не было, и почему, случись вам в те времена прикоснуться к его лицу, он уверял бы вас, что его фантомная

рука ощущает ваше прикосновение? Как же так? Разве соседние участки не забрали и не поделили между собой кортикальное представительство ампутированной руки? Дело в том, что прикосновение к руке представлено не только клетками соматосенсорной коры, но и теми, которым они «спускают» сигналы вдоль нисходящей цепочки, и теми, что расположены еще ниже по цепочке и получают сигналы от предыдущих.



*Рис. 3.3. Мозг редактирует отображаемый им план тела. Когда человеку ампутируют кисть, прилежащие кортикальные проекции узурпируют освободившуюся территорию, которая ранее принадлежала кисти*

Хотя в первичной соматосенсорной коре карта тела быстро модифицируется под его новое строение, в нижележащих областях она меняется все меньше и меньше. У родившегося без руки ребенка карта будет выглядеть совершенно иначе, но у взрослого человека, например у того же Нельсона, система не настолько гибка, чтобы полностью перестроиться. В глубинах его мозга нейроны, расположенные ниже соматосенсорной коры, не могли в такой же степени поменять свои связи и потому продолжали пребывать в уверенности, что любая передаваемая им активность все еще вызвана прикосновением к руке. В итоге Нельсон чувствовал призрачное присутствие отсутствующей руки<sup>9</sup>.

\*\*\*

Случаи обезьянок из Сильвер-Спринг, адмирала Нельсона и ветеранов Гражданской войны в США свидетельствуют об одном и том же явлении: когда поток входных сигналов внезапно обрывается, сенсорные

## Живой мозг

корковые поля не остаются бесхозными; напротив, соседи немедленно занимают их<sup>10</sup>. Тысячи исследований, проводимых сегодня методами сканирования мозга пациентов с ампутированными конечностями, показывают, насколько отличается мозговая ткань от хардвера — аппаратных средств с жестко заданной схемой — тем, что умеет динамично перераспределяться.

Притом что ампутация приводит к кардинальной реорганизации кортикалной ткани, конфигурация мозга способна меняться и в ответ на менее значительные видоизменения в теле. Например, если мне придется затянуть у вас на предплечье манжетку для измерения давления, ваш мозг подстроится под слегка ослабшие входные сигналы от руки тем, что выделит меньшую площадь для этой части тела<sup>11</sup>. То же самое произойдет в мозге, если обслуживающие вашу руку нервы будут надолго заблокированы действием анестезии. И если вы просто свяжете два соседних пальца на руке — так, что вы сможете действовать ими только как единым целым, — их прежде отдельные кортикалные представительства в конце концов сольются в целостную структуру<sup>12</sup>.

Но тогда каким образом мозг, обреченный торчать на высоком настене в полной тьме, исхитряется непрерывно отслеживать форму тела и любые перемены, происходящие с ней?

## Тайминг решает все

Представьте, что вы рассматриваете окрестности с высоты птичьего полета. Вы заметите, что одни собачники обычно выгуливают своих питомцев в шесть утра, другие выходят на прогулку не раньше девяти, третьи выводят своих любимцев на улицу после полудня. Ну а некоторые предпочитают прогулки под покровом ночи. Если вы какое-то время понаблюдаете за ходом жизни в вашей округе, то увидите, что собачники, выбирающие для выгула одно и то же время, обычно знакомы, раскланиваются друг с другом, останавливаются поболтать, а то и ходят друг к другу в гости на барбекю. Совпадение во времени ведет к дружбе.

То же самое происходит и у нейронов. В состоянии возбуждения они проводят лишь крохотную долику времени, когда посыпают короткие электрические импульсы (их еще называют спайками). Время их возникновения критически важно. Присмотримся к отдельно взятому типично му нейрону. Он пытается установить контакт с десятком тысяч соседей,

но не формирует одинаково прочные связи со всеми ними. Прочность связей зависит от времени. Если нейрон выдал импульс, а сразу следом импульс выдает связанный с ним нейрон, то контакт между ними усиливается. Это правило, известное как правило Хебба\*, можно кратко обобщить так: нейроны, которые возбуждаются вместе, соединяются вместе (см. также главу 10)<sup>13</sup>. В тканях мозга новорожденного нервы, ведущие от тела к мозгу, активно разветвляются. Однако постоянные связи формируются только между нейронами, чьи импульсы очень близки по времени. В силу синхронности контакты между ними укрепляются. Правда, нейроны не ходят друг к другу на барбекю, а вместо этого выделяют больше нейромедиаторов или создают больше рецепторов для их получения, что усиливает связь между ними.

Каким же образом этот нехитрый прием приводит к образованию карты тела? Задумаемся, что происходит, когда вы физически взаимодействуете с объектами окружающего мира, например натыкаетесь на них, трогаете, прижимаете к себе, ударяете, похлопываете. Так, когда вы берете кружку с кофе, соответствующие участки кожи на ваших пальцах обязательно активируются, и притом одновременно. Так же активируются участки кожи на ступнях, когда вы надеваете обувь, и тоже одновременно. А вот противоположный пример: прикосновения к безымянному пальцу руки и к мизинцу ноги не могут похвастаться частой синхронностью, потому что в жизни редко возникают ситуации, в которых они активировались бы в одно и то же время. Та же логика распространяется на все тело: прилежащие участки чаще активируются более синхронно, чем участки не соседствующие. После взаимодействия с миром между участками кожи, которые активируются одновременно, возникает связь, а те, чья активность не сопрягается по времени, как правило, остаются не связанными друг с другом. Вследствие многолетних коактиваций вырисовывается атлас прилежащих участков, это и есть топографическая карта тела. Иными словами, карта тела содержится в мозге благодаря простому правилу, которое диктует отдельно взятым мозговым клеткам, как им образовывать связи между собой: нейроны, чья активность близка по времени, склонны устанавливать и поддерживать взаимные связи. Таким путем в вечной темноте мозга проступает карта тела<sup>14</sup>.

А почему карта меняется с изменением входных сигналов?

---

\* Дональд Хебб (1904–1985) — канадский физиолог и нейропсихолог. Известен работами, приведшими к пониманию значения нейронов для процесса обучения. Его также называют одним из создателей теории искусственных нейронных сетей. *Прим. ред.*

## Колонизация в режиме нон-стоп

В начале XVII века Франция развернула колонизацию Северной Америки. Каким образом? К берегам новой земли отправлялись суда, подвязку набитые французскими переселенцами. Такая практика оказалась действенной: переселенцы осваивали и обживали новые территории. В 1609 году французы основали факторию для скупки мехов у местного населения. Со временем поселение выросло в город Квебек, которому судьба уготовила стать столицей Новой Франции. Через четверть века французы распространили колонизацию на Висконсин. Потоки все новых и новых французских переселенцев пересекали Атлантику. Новая Франция расширялась.

Однако удерживать колонизованную территорию оказалось не так-то просто. Франция сталкивалась с неослабной конкуренцией со стороны других великих держав, главным образом Великобритании и Испании, которые тоже посыпали в Новый Свет суда с переселенцами. С какого-то момента французский король Людовик XIV начал интуитивно постигать важный урок: если он желает прочно закрепить Новую Францию как заморское владение французской короны, следует непрерывно отправлять за океан французские суда, потому что британцы посыпали через Атлантику еще больше судов. Кроме того, чутье подсказывало Людовику, что население Квебека растет медленно из-за недостатка женщин, и он отправил в колонию 850 девушки («королевских невест», как их называли), чтобы стимулировать умножение местного французского населения. Замысел короля дал свои плоды: к 1674 году население Новой Франции выросло до 7 тысяч человек, а к 1689 году достигло 15 тысяч (рис. 3.4).

Но вот досада: Британия отправляла в колонии еще больше молодых мужчин и женщин. Если Новую Францию в 1750 году населяли 60 тысяч человек, то население британских колоний разрослось до миллиона. Это и решило исход последующих колониальных войн между двумя державами: несмотря на добрые союзнические отношения с местными индейскими племенами, превосходящие силы оставались на стороне британцев. Одно время французское правительство с целью повышения численности населения даже принуждало освобождавшихся из тюрем мужчин жениться на местных проститутках, после чего молодоженов сковывали цепью, чтобы не разбежались, и отправляли в Луизиану осваивать новые земли. Однако этих усилий оказалось недостаточно.

К исходу шестой войны с британцами французы осознали, что их дело проиграно. Составлявшие Новую Францию территории растащили

противники: остатки Канады перешли под контроль Великобритании, а Луизиана — к новообразованному государству Соединенные Штаты Америки<sup>15</sup>.



Рис. 3.4. Северная Америка, 1750 год

Причина, по которой Франция сначала прочно удерживала свои заморские колонии, а потом ее хватка безвозвратно ослабла, имеет самое непосредственное отношение к количеству посылаемых в колонии судов. В условиях беспощадной конкуренции французы отправляли в Новую Францию слишком мало переселенцев, чтобы те смогли прочно закрепиться там и удержать территорию. И от французского присутствия в Новом Свете осталось разве что топонимическое воспоминание в виде названных на французский лад Луизианы, Вермонта и Иллинойса.

Легко колонизовать новые земли, когда тебе никто не мешает, зато, когда на них претендуют могущественные соперники, требуются постоянные усилия, иначе окажешься в проигрыше. Такая же нескончаемая колониальная война протекает у нас в мозге. Когда какая-либо часть тела перестает посыпать в мозг сигналы, она теряет свою кортикульную территорию. Руку адмирала Нельсона можно уподобить Франции, а кору его мозга — Новому Свету. Все начиналось со здоровой колонизации: несущие информацию электрические импульсы от руки адмирала исправно поставляли по нервным волокнам полезную информацию в адмиральский мозг, и в юности его правая рука надежно удерживала закрепленную за ней территорию. Но прилетела мушкетная пуля, а спустя несколько часов раздробленная рука сгинула в морской пучине

## Живой мозг

и мозг Нельсона перестал получать сигналы от этой части тела. Со временем ампутированная рука утратила кортикалную недвижимость, в коре сохранились лишь слабые отзвуки ее былого присутствия в виде фантомных болей.

Эти уроки колонизации применимы не только к руке, они распространяются на любую систему организма, посылающую информацию мозгу. Когда у индивида повреждены оба глаза, визуальная информация больше не проходит по сигнальным путям в затылочную кору (участок в задней части мозга, часто называемый зрительной корой). Соответственно, эта часть коры перестает быть зрительной. Груженные визуальной информацией суда больше не пристают к ее берегам, и на бесхозную территорию тут же находятся охотники — конкурирующие царства-государства сенсорной информации<sup>16</sup>. И когда незрячая женщина скользит пальцами по выпуклым точкам набранного шрифтом Брайля стихотворения, ее затылочная кора активируется от простого прикосновения<sup>17</sup>. Если у этой женщины в результате инсульта будет повреждена затылочная доля коры, она утратит способность понимать шрифт Брайля<sup>18</sup>, потому что после утраты зрения эта часть ее мозга колонизирована осязанием (рис. 3.5).

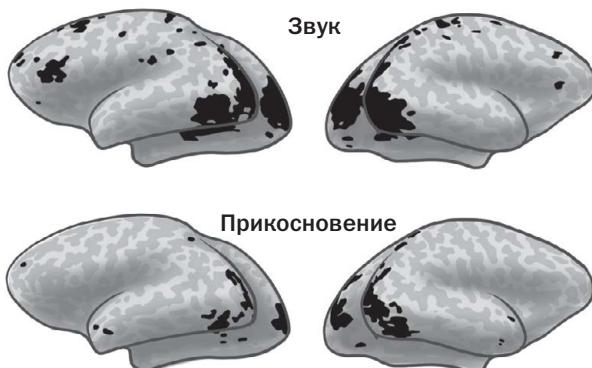


Рис. 3.5. Кортикалная реорганизация: неиспользуемый участок коры захвачен соседями-конкурентами. На скане мозга можно видеть, что у незрячего индивида звук и прикосновение активируют затылочную долю коры, которая у зрячего человека от звука или прикосновения не активируется (черной заливкой отмечены участки, более активные у незрячего индивида по сравнению со зрячим). Для лучшей видимости образуемых корой головного мозга холмов и долин изображение мозга слегка «раздуть» компьютерными методами<sup>19</sup>.

Все это относится не только к осязанию, но и к другим поставляющим мозгу информацию органам чувств. Когда незрячие индивиды

слышат звуки, у них активируется не только слуховая зона коры мозга, но и зрительная<sup>20</sup>.

У слепца активировать прежде закрепленный за зрением участок коры способны не только звуки и прикосновения, но и запахи, вкус, а также вспоминание событий или решение математической задачи<sup>21</sup>. Так же, как могущественные колониальные державы в Новом Свете отобрали земли у побежденного конкурента, в мозге жестоко конкурирующие органы чувств забирают у зрения его корковую территорию.

В последние годы история кортикальных захватов украсилась еще более любопытными подробностями: когда новоявленные оккупанты захватывают территорию зрительной коры, они сохраняют часть прежней архитектуры — так в Турции бывшие римско-католические храмы перестроили в мечети. Приведу пример: область коры у зрячего человека, отвечающая за обработку визуально воспринимаемого письменно-го языка, — это та же самая область, которая у незрячего активируется при чтении текста, набранного шрифтом Брайля<sup>22</sup>. Аналогично область, обрабатывающая визуальные движения у зрячих, активируется при тактильных движениях у слепых (например, когда человек что-то трогает пальцами или языком)<sup>23</sup>. Главная нервная сеть, задействованная у зрячего индивида в визуальном распознавании объектов, у незрячего активируется от прикосновений к ним<sup>24</sup>. Данные наблюдения привели к гипотезе, что мозг представляет собой скорее «машину для решения задач» (например, для распознавания движения или объектов окружающего мира), чем систему, организацию которой определяют конкретные органы чувств<sup>25</sup>. Иными словами, области мозга заботятся о решении определенного типа задач независимо от того, по какому из сенсорных каналов поступает информация.

Попутно замечу, что возраст играет здесь свою роль, к чему мы вернемся немного позже. У индивидов с врожденным отсутствием зрения вся затылочная кора перехвачена представительствами других органов чувств. Если человек теряет зрение в раннем возрасте (скажем, лет в пять), захват затылочной доли коры происходит не полностью. У поздно ослепших (утративших зрение позже десятилетнего возрас-та) кортикальные захваты еще меньше. Чем старше мозг, тем меньше в нем остается гибкости для перераспределения кортикальной терри-тории — как у государственных границ на североамериканском кон-тиненте, которые почти не меняются с тех пор, как установились три века тому назад.

Происходящее в мозге ослепшего человека наблюдается и при утрате функции любого другого органа чувств. Например, у глухих индивидов

территорию слуховой коры перехватывают и используют зрение, а также другие чувства<sup>26</sup>. Как потеря руки у адмирала Нельсона привела к кортикальным захватам освободившейся территории соседними представительствами, так и потеря слуха, обоняния, вкуса или другого чувства влечет за собой подобного же рода передел кортикальных границ. Картография мозга постоянно меняется, чтобы входящие данные могли быть представлены наилучшим образом<sup>27</sup>.

Стоит только присмотреться, и вы увидите, что конкуренция за территории происходит постоянно и повсеместно. Возьмем для примера аэропорт в крупном городе. Если он принимает много рейсов одной авиакомпании (пусть это будет United), а рейсов, выполняемых другой авиакомпанией (скажем, Delta), меньше, то вполне ожидаемо, что количество стоек регистрации United станет увеличиваться, а тех, что обслуживают пассажиров Delta, наоборот, — уменьшаться. Авиакомпании United аэропорт отведет больше ворот выхода на посадку, больше места в зоне получения багажа и больше пространства на мониторах воздушных диспетчеров. Если какая-то из авиакомпаний свернет свою деятельность (вспомните Trans World Airlines\*), отведенные ей пространства в аэропорту будут тут же перехвачены другими авиакомпаниями. То же самое происходит в мозге при распределении кортикальных территорий, принимающих входные потоки сенсорной информации.

Теперь мы понимаем, как конкуренция приводит к захвату территорий более успешными конкурентами. Возникает следующий вопрос: когда одно из чувств расширяет свое представительство в коре мозга, обостряется ли оно, расширяются ли его возможности?

## Чем больше, тем лучше

Мать бросила Ронни в возрасте одного года, вскоре после того как стало понятно, что малыш слеп. Она заявила, что слепоту сына Господь послал ей в наказание. До пяти лет Ронни воспитывался в бедности на попечении бабки и деда, а потом его отослали в школу для незрячих.

Когда мальчику было шесть лет, его навестила мать, единственный раз за все время. К тому моменту у нее появился второй ребенок, девочка. «Рон, я хочу, чтобы ты потрогал ее глаза. У нее, понимаешь ли, очень миленькие глазки. Она не опозорит свою мамочку, как это сделал

---

\* Прекратила работу 1 декабря 2001 года в связи с поглощением авиакомпанией American Airlines. Прим. пер.

ты. Она видит». С тех пор Ронни больше ни разу не встречался со своей мамашей.

Мальчику досталось тяжелое детство, но при всех невзгодах со временем стало ясно, что он необычайно музыкально одарен. Воспитатели заметили его дар и определили изучать классическую музыку. Через год Ронни научился играть на скрипке, да так, что учителя объявили его виртуозом. Затем освоил фортепиано, гитару и еще несколько струнных и деревянных духовых инструментов.

Отсюда и начался его взлет: Ронни завоевал невероятную популярность, был признан одним из выдающихся певцов и исполнителей своего времени, его композиции в жанрах поп-музыки и кантри-вестерн 40 раз взлетали на вершины чартов, а сам Ронни удостоился шести премий «Грэмми».

Ронни Милсап если и первый, то далеко не единственный незрячий музыкант, вознесшийся к вершинам славы; в этой плеяде — Андреа Бочелли, Рэй Чарльз, Стиви Уандер, Дайан Шуур, Хосе Фелисиано и Джеки Хили. Не получая зрительной информации, их мозг выучился полагаться на слуховые и тактильные сигналы от окружающего мира и более искусно обрабатывать их, чем мозг зрячих людей.

Хотя далеко не всем слепцам гарантированы вершины музыкальной славы, реорганизация мозга им обеспечена безусловно. Благодаря этой реорганизации в мозге незрячих сверхразвита способность распознавать высоту звука (музыкальный слух); они вдесятеро тоньше, чем зрячие, улавливают малейшие оттенки музыкальных тонов<sup>28</sup> — потому, что отвечающая за слух кортикальная территория у них обширнее. В одном лабораторном эксперименте с участием зрячих и незрячих индивидов и тем и другим наглоухо закрывали одно ухо и просили указать место, откуда исходит тот или иной звук. Поскольку для локализации источника звука мозгу необходимо сопоставлять слуховые сигналы от обоих ушей, авторы эксперимента ожидали, что участники феерически проявят задание. Собственно, у зрячих испытуемых эти ожидания полностью подтвердились. А незрячие в целом более или менее правильно определяли, где располагается источник звука<sup>29</sup>. Почему? Да потому, что причудливый хрящ ушной раковины (даже одной) очень тонко отражает звуки и подсказывает их источник, но только если индивид настроен улавливать именно эти звуки. У зрячих за слух отвечает меньшая, чем у незрячих, область коры, и потому способность улавливать нюансы звуковой информации у них недоразвита.

Незрячим людям свойственен невероятно обостренный слух. Так, у Бена Андервуда в возрасте двух лет перестал видеть левый глаз. Мать

## Живой мозг

отвела его к врачу, и вскоре обследование выявило у мальчика рак сетчатки обоих глаз. Облучение и химиотерапия не дали результатов, и Бену в три года удалили оба глаза. А к семи годам он самостоятельно освоил полезную, но очень уж неожиданную методу «зрения»: щелкал языком и улавливал эхо от окружающих предметов. Таким образом он научился различать, где располагаются, например, дверные проемы, окружающие его люди, припаркованные автомобили. Мальчик овладел техникой эхолокации: посыпал звуковые волны и ловил их отражения от предметов<sup>30</sup>.

Документальный фильм о Бене начинался с заявления, что он единственный в мире человек, способный видеть с помощью эхолокации<sup>31</sup>. Но тут авторы допустили ряд ошибок. Во-первых, мы не знаем, мог или не мог Бен *видеть* в том смысле, какой вкладывают в это понятие зрячие; известно лишь, что его мозг обладал способностью преобразовывать акустические волны в некоторое практическое понимание, преграждающие ли ему путь крупные объекты. Впрочем, подробнее поговорим об этом ниже.

Во-вторых, и это важнее, Бен не единственный, кто освоил метод эхолокации: тысячи незрячих людей тоже преуспели в этом<sup>32</sup>. На самом деле данный феномен обсуждается по меньшей мере с 1940-х годов, когда впервые появился термин «эхолокация», употребленный автором статьи Echolocation by Blind Men, Bats and Radar, опубликованной в журнале *Science*<sup>33</sup>. Автор среди прочего отмечал: «Многие слепые люди со временем вырабатывают значительную способность не наталкиваться на препятствия, руководствуясь слуховыми подсказками от намеренно издаваемых ими звуков». В качестве примеров он назвал звуки шагов, постукивание тростью или щелчки пальцами. И показал также, что у таких людей способность успешно применять эхолокацию резко снижается из-за посторонних шумов или ушных тампонов.

Как мы уже видели, мозг может привлекать прежде отвечавшую за зрение затылочную долю коры для многих других функций, кроме слуха. Так, от дополнительной кортикальной территории может выиграть запоминание. В одном исследовании проверяли способность незрячих запоминать списки слов. Лучше всего проявили себя индивиды с большей территорией, захваченной у затылочной коры: это дало им возможность уделять больше кортикальной территории тесту на запоминание<sup>34</sup>.

Если рассматривать данный феномен в целом, правило простое и однозначное: чем больше кортикальной территории, тем лучше. Правда, иногда это приводит к неожиданным результатам, казалось бы противоречащим здравому смыслу. У большинства людей от рождения имеются три типа фоторецепторов для цветного зрения, но некоторые рождаются

с двумя типами фоторецепторов, всего с одним или вообще без таких, из-за чего у них снижена (или вообще отсутствует) способность различать цвета. Однако у людей с цветовой слепотой дела обстоят не совсем плохо: они лучше распознают градации серого цвета<sup>35</sup>. Почему? А потому, что их зрительная кора занимает такую же территорию, как у других людей, а работает с меньшим числом характеристик цвета. Таким образом, когда для решения простой задачи отводится больше кортиковальной территории, эффективность восприятия повышается. Например, в армии военнослужащих с цветовой слепотой не действуют в целом ряде задач, однако уже известно, что они способны лучше распознавать на местности маскировочные ухищрения противника, чем те, у кого нормальное цветовое зрение.

И хотя мы привычно действуем систему визуализации, когда дело касается чего-либо важного, функциональная реорганизация кортиковальных областей происходит повсеместно. Когда человек теряет слух, нейронная ткань, прежде отвечавшая за эту функцию, принимает на себя представительство других органов чувств<sup>36</sup>. Поэтому не стоит удивляться, что у страдающих глухотой улучшается периферическое визуальное внимание или что они нередко видят особенности вашего выговора, например способны определить, из какой части страны вы родом, потому что отлично приспособились читать по губам. (Аналогично после ампутации конечности обостряется чувствительность туловища.) Такой человек способен уловить даже легчайшее прикосновение, а если два прикосновения следуют друг за другом и воспринимаются как одно, он все равно почивает, что их было два, потому что мозг передает больше кортиковальной территории введение неповрежденных органов и их чувствительность приобретает большее разрешение.

\*\*\*

На смену прежней парадигме, считающей функции областей мозга предопределенными, приходит понятие нейронной реорганизации: мозг способен перераспределять функции нейронной ткани. Таким образом область может быть переориентирована для решения других задач. Например, в нейронах зрительной коры ничего особенного нет. Это просто-напросто нейроны, которые волей случая задействованы в обработке информации, касающейся выступающих поверхностей и цветов у людей со здоровыми глазами. У незрячих те же самые нейроны способны прекрасно обрабатывать информацию от других органов чувств.

Прежняя парадигма допускала, что обозначенная как Луизиана территория на североамериканском континенте предназначена

исключительно для французов. В соответствии с новой парадигмой нет ничего удивительного в том, что земли Луизианы были выставлены на продажу и их покупали выходцы со всех концов света. Поскольку мозг вынужден распределять все свои задачи между участками коры, объем которой конечен, можно предположить, что часть мозговых нарушений вызвана неоптимальностью их распределения. Один из примеров этого — ученый аутист\* (когда ребенок с тяжелыми нарушениями способностей к познанию, социальному взаимодействию и общению искусен в какой-либо одной узкой области, скажем может с легкостью запомнить все номера в телефонной книге, с исключительной точностью деталей нарисовать увиденную сценку или в мгновение ока собрать кубик Рубика). По поводу сочетания умственной отсталости и выдающейся одаренности выдвинуто множество теорий, но в нашем контексте интерес представляет та, что связывает данный феномен с необычным распределением кортикального пространства<sup>37</sup>. Здесь идея в том, что виртуозно проделывать странные вещи возможно, если мозг отдает для решения какой-то одной задачи слишком большой участок кортикальной поверхности (скажем, для запоминания, визуального анализа или сборки пазлов). Однако подобные сверхспособности достигаются в ущерб другим задачам, между которыми в норме распределяется кортикальная территория, включая, например, подмножество задач, в сумме обеспечивающих прочные коммуникативные навыки.

## Ослепительная скорость

Последние годы ознаменовались рядом научных прозрений относительно пластичности мозга, но думается, что наибольший сюрприз преподнесла нам скорость, с которой он срабатывает. Несколько лет назад ученые из Университета Макгилла провели сканирование мозга группе взрослых, только что лишившихся зрения. Участникам эксперимента давали слушать звуки. Неудивительно, что при этом у них активировалась слуховая кора. Но одновременно наблюдалась активность и в затылочной доле, что было невозможно всего несколькими неделями ранее, когда участники эксперимента еще не утратили зрения. Правда, активность эта оказалась слабее, чем у людей, долгое время пребывших незрячими, но тем не менее измеримой<sup>38</sup>.

---

\* Термин «ученый аутист» (autistic savant) предложил американский ученый Бернард Римланд, один из создателей современной теории аутизма. Прим. науч. ред.

Эксперимент показал, что при утрате зрения мозг способен быстро меняться. Но насколько быстро?

Нейролог Альваро Паскуаль-Леоне заинтересовался, какими темпами могут происходить крупные перемены в мозге. Он обратил внимание, что начинающих воспитателей (инструкторов) в школах для слепых просят семь полных дней ходить с завязанными глазами, чтобы на собственном примере понять, каковы опыт и впечатления от общения с миром у их будущих учеников. В результате, как отмечали сами воспитатели, у большинства из них улучшилась способность различать и анализировать звуки, ориентироваться в пространстве, сообразуясь с ними, судить о расстоянии до предметов и определять, что это за предметы:

«По словам некоторых, у них появилась способность быстро и безошибочно узнавать человека по голосу, когда он только начинал говорить, или по ритму шагов, если он просто проходил мимо. Кто-то научился различать автомашины разных марок по звуку работающего двигателя, а один описал, как его радовало, что он может различить по характеру шума мотора марки проезжающих вдали мотоциклов»<sup>39</sup>.

Все это навело Паскуаля-Леоне и его коллег на мысль проверить в лабораторных условиях, что произойдет в мозге зрячего человека, если он проведет несколько дней с завязанными глазами. Эксперимент был реализован и открыл нечто на грани чуда: обнаружилось, что реорганизация нервных функций — того же типа, что и у незрячих, — происходит также и у зрячих, на некоторое время лишенных зрения. И происходит быстро.

В одном из последующих экспериментов группа Паскуаля-Леоне в течение пяти дней держала участников с завязанными глазами, и все это время их интенсивно обучали читать точечно-рельефный шрифт Брайля<sup>40</sup>. По прошествии пяти дней испытуемые этой группы уже очень неплохо узнавали буквы Брайля по легким различиям в образующих их значках — и притом намного лучше, чем контрольная группа зрячих участников, которых тоже все эти дни обучали освоению шрифта Брайля, но без повязок на глазах. Особенно впечатляющими оказались перемены, выявленные при сканировании мозга. В течение пяти дней участники с завязанными глазами, прикасаясь к предметам, задействовали свою затылочную кору, а контрольная группа, как и ожидалось, — только соматосенсорную. У условно незрячих обнаружилась также реакция затылочных долей на звуки и слова.

Когда экспериментаторы намеренно нарушали новоявленную активность затылочной доли магнитными импульсами, преимущество в чтении шрифта Брайля у условно незрячих исчезало, и это указывало, что включение данной части мозга было не случайным побочным эффектом, а важной частью усовершенствования поведенческой активности. Когда же с участников эксперимента сняли повязки, ответ затылочной коры на прикосновение и звук исчез в тот же день, и с того момента их мозг на сканах уже ничем не отличался от мозга любого зрячего человека.

В другом исследовании визуальные области мозга были тщательно картированы с применением более совершенных методик нейровизуализации. Испытуемых с завязанными глазами поместили в сканирующее устройство и попросили выполнить тест на касание, требовавший высокой тактильной чувствительности пальцев. В таких условиях исследователи могли фиксировать активность, возникавшую в первичной зрительной коре участников всего через 40–60 минут в состоянии вынужденной слепоты<sup>41</sup>.

В результатах эксперимента ошеломляла скорость, с какой происходили перемены. Мозг меняет конфигурацию замечательно быстро, это вам не флегматичный дрейф литосферных плит. Обратившись к следующим главам, мы увидим, как зрительная депривация демаскирует уже существующий поток невизуальной информации, поступающей в зрительную кору, и поймем, что мозг, как пружина в мышеловке, все время на взводе и готов быстро перестроиться. Сейчас важно, что изменения в нем происходят быстрее, чем осмеливались предполагать самые оптимистичные нейробиологи в начале XXI столетия.

\*\*\*

Теперь давайте отступим назад и посмотрим на картину немного шире. Как острые клыки и быстрые ноги полезны для выживания, так полезна и гибкость нервной системы: она позволяет мозгу оптимизировать свои функции в разнообразных средах.

Однако конкуренция в мозге может дать и негативный эффект. При всяком нарушении баланса в действии чувств в коре потенциально возможен территориальный захват, и притом быстрый. Перераспределение кортикальных ресурсов может быть оптимальным, когда конечность или какой-то из органов чувств утрачены безвозвратно, однако в других сценариях быстрый захват участка кортикальной территории может встретить решительный отпор. Это соображение подвело нас с моим бывшим студентом Доном Воном к новой теории о происходящем в мозге под покровом ночной темноты.

## Что общего у сновидений и вращения планеты?

Нейрофизиология еще не разрешила загадку, почему в мозге возникают сновидения. Что вообще такие причудливые ночные галлюцинации? Содержатся ли в снах некие смыслы и значения или же это всего лишь случайная активность мозга в попытках составить связный нарратив? И почему сны так богаты зрительными образами и еженощно взрывают затылочную кору неистовыми всполохами активности?

Подумаем вот о чем: в беспрерывной и беспощадной конкуренции за кортикальную территорию зрительная система сталкивается с проблемой, неизвестной другим сенсорным системам. При каждом обороте Земли вокруг своей оси зрительная система погружается во мрак примерно на двенадцать часов. (Сказанное относится к 99,9999% эволюционной истории нашего вида, но понятно, что не к нашей озаренной благословенным электричеством современности.) Как мы уже видели, сенсорная депривация разжигает захватнические инстинкты прилежащих кортикальных представительств. А что может противопоставить этому изъяну незаслуженно обиженная природой зрительная система?

Она поддерживает активность затылочной доли коры в неурочныеочные часы.

Итак, мы с Воном предположили, что сновидения призваны ограждать зрительную кору от территориальных посягательств соседей. В конце концов, не нарушает же вращение планеты ваши способности осязать, слышать, чувствовать вкус или запах; от темноты страдает только зрение. Каждая ночь несет зрительной коре угрозу захвата со стороны других чувств. Угрозу жуткую и неотвратимую, если учесть, с какой ошеломительной скоростью свершаются в мозге территориальные переделы (как мы уже видели, для этого достаточно каких-то 40–60 минут). Сновидения и есть оружие, которое выковала зрительная кора для защиты своих пределов и отпора загребущим соседям-захватчикам.

Теперь для большего понимания сути вопроса снова перейдем на общий план. На беглый взгляд, спящий расслаблен и отключен, но на самом деле в его мозге в это время отмечается полноценная электрическая активность. Большую часть ночи спящий человек снов не видит. Однако в фазе быстрого сна (БДГ-сна, то есть сна с быстрым движением глаз) в мозге приключается нечто любопытное: частота сердечных сокращений и дыхания возрастает, мелкие мышцы подергиваются,

## Живой мозг

мозговые волны уменьшаются и ускоряются. В этой фазе мозг рождает сновидения<sup>42</sup>.

Фазу БДГ-сна запускает действие определенной группы нейронов в структуре стволового отдела мозга, называемой варолиев мост\*. Повышенная активность данных нейронов имеет два следствия. Первое состоит в том, что в этой фазе крупные мышечные группы находятся в расслабленном состоянии. Сложная нейронная схема «замораживает» тело, ее затейливость указывает на высокое биологическое значение сна со сновидениями; как предполагается, схема такой сложности не могла бы развиться, не выполняя она важную для организма функцию. Заблокированные на время сна мышцы позволяют мозгу имитировать опыт взаимодействия с миром без фактических передвижений тела.

Второе следствие также очень важно: из ствола головного мозга в затылочную (зрительную) кору поступают волны нервных импульсов (рис. 3.6)<sup>43</sup>. Когда эти волны достигают места назначения, их активность воспринимается нами как зрительная; иными словами, мы видим. Вот почему наши сны так живописны, колоритны и кинематографичны, а не схематичны или абстрактны.

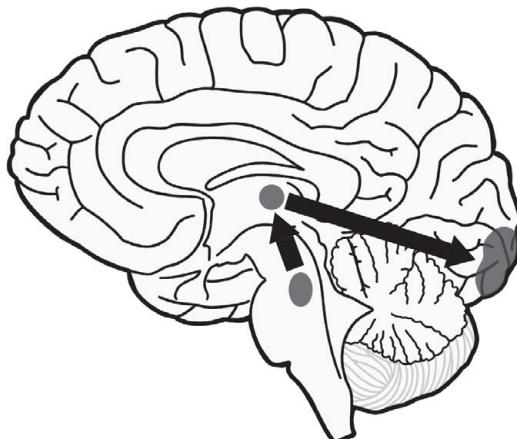


Рис. 3.6. Во время сна со сновидениями волны импульсов зарождаются в стволе головного мозга и достигают затылочной коры. Мы предполагаем, что это вливание активности вызвано вращением планеты во тьме ночи.

Следовательно, визуальная система нуждается в особой стратегии, чтобы охранять свои пределы от посягательств

\* Назван в честь итальянского анатома XVI века Костанцо Варолия, который впервые описал его. Прим. пер.

Сочетание двух описанных выше следствий активности в варолиевом мосту искусно сплетается в опыт переживания сновидений: вторжение электрических волн в зрительную кору активирует зрительную систему, а из-за заблокированных мышц двигательная активность в русле сюжета сновидения невозможна.

Согласно нашей теории схема нейронной сети, лежащая в основе визуальных сновидений, образовалась совсем не случайно. Напротив, чтобы не допускать захвата своей кортикалной территории, зрительная система вынуждена отстаивать ее, для чего генерирует всплески электрической активности всякий раз, когда в силу вращения планеты наступает ночь<sup>44</sup>. В условиях постоянной конкуренции за территорию сенсорного представительства затылочная доля коры хорошо поднаторела в самообороне. Как-никак зрение снабжает нас критически важной для совершения действий информацией, однако половину времени ее предательски крадет ночная тьма. В этом смысле сновидения можно рассматривать как нечаянное дитя любви от союза нейронной пластичности с суточным вращением планеты.

Ключевой момент, на который следует обратить особое внимание, — анатомическая точностьочных залпов электрической активности. Они исходят из стволового отдела мозга и направлены всегда в одно и то же место — затылочную долю коры. Если бы эта часть нейронной сети разветвлялась широко и беспорядочно, следовало бы ожидать, что она установит связи со многими областями по всему мозгу. Но не тут-то было. Нейронная сеть анатомически безшибочно прорастает в одно и только одно конкретное место — крошечную структуру, называемую *латеральным коленчатым ядром*, которое транслирует сигналы конкретно и точно в затылочную долю коры. С позиций нейроанатомии такая конкретная направленность нейронных связей должна быть предназначена для важной функции.

С этой точки зрения неудивительно, что даже у незрячего от рождения индивида сохраняется такая же, как у всех других людей, схема нейронных связей, соединяющая стволовой отдел мозга с затылочной долей коры. А как обстоит дело со сновидениями у незрячих? Можно ли ожидать, что они совсем не видят снов, поскольку темнота для их мозга ничего не значит? Ответ на этот вопрос открывает глаза на многое. С рождения слепые люди (или утратившие зрение в очень раннем возрасте) не видят в снах зрительных образов, но определенно и непременно переживают другого рода чувственный опыт, например ощущают, что идут по знакомой гостиной, где мебель переставлена на другие места, слышат лай или вой диковинных зверей<sup>45</sup>. Это прекрасно укладывается

## Живой мозг

в недавно усвоенный нами урок: затылочная доля коры у незрячих захвачена и поделена другими органами чувств. Таким образом, у слепых от рождения людей все равно происходит ночная активация затылочной коры, но переживается это как нечто невизуальное. Иными словами, при нормальных обстоятельствах ваша генетика исходит из той логики, что лучший способ бороться с несправедливостью ночной темноты по отношению к зрению — ночами посыпать волны активности в затылочную долю коры; точно так же обстоит дело в мозге незрячего человека, несмотря на то что первопричина этой задумки утрачена. Обратите внимание, что в сновидениях людей, потерявшим зорение после семи лет, больше визуального содержания, чем у тех, кто стал незрячим раньше, и это укладывается в тезис, что у ослепших в более позднем возрасте затылочная доля коры в меньшей степени захвачена другими чувствами, и потому ее активность переживается индивидом как более насыщенная зрительными образами<sup>46</sup>.

Весьма любопытно, что две другие области мозга — гиппокамп и префронтальная кора — во время сна со сновидениями менее активны, что предположительно объясняет, почему нам так трудно запоминать сновидения. Почему мозг на время сна выключает из работы эти две области? Одна из возможных причин в том, что нет смысла записывать в память сюжеты снов, если главное их назначение — всего лишь поддерживать активность зрительной коры для отражения атак соседей на ее кортикальную территорию.

Много важного и любопытного дают межвидовые сравнения. У ряда млекопитающих детеныши рождаются недоразвившимися — в том смысле, что не могут передвигаться, регулировать температуру тела, добывать пищу или защищаться от противников. Примерами служат человек, хорек, утконос. Детеныши других видов млекопитающих — морских свинок, овец, жирафов — появляются на свет уже развитыми: у них имеются зубы, меховой покров, открытые глаза и способность к терморегуляции, а самостоятельно передвигаться они способны уже через час после рождения, равно как и пытаться твердой пищей. Важное различие тут вот в чем: животные, которые рождаются недоразвившимися, проводят в фазе БДГ-сна гораздо больше времени, чем те, что родились уже развившимися. Это особенно очевидно в первый месяц жизни<sup>47</sup>. Мы объясняем этот факт тем, что, приходя в этот мир, высокопластичный мозг вынужден беспрерывно бороться за поддержание своих составляющих в состоянии равновесия. А когда на свет является в основном уже сложившийся мозг, необходимость ввязываться вочные битвы уменьшается.

Более того, обратите внимание, что с возрастом количество БДГ-сна снижается. Фаза быстрого сна свойственна млекопитающим всех видов, однако по мере старения ее продолжительность неуклонно падает<sup>48</sup>. Что касается нашего вида, у младенцев примерно 50% сна приходится именно на эту фазу, у взрослых — только от 10 до 20%, а у пожилых людей быстрый сон занимает и того меньше времени. Данная межвидовая закономерность хорошо согласуется с тем фактом, что младенческий мозг намного более пластичен, чем взрослевший (и мы еще увидим это в главе 9), и потому конкуренция за кортикалную территорию приобретает еще более критическое значение. По мере взросления животного возможность кортикалных захватов снижается. Ослабление пластичности мозга происходит параллельно с сокращением времени, проводимого в фазе быстрого сна.

Наша гипотеза позволяет сделать одно предположение на отдаленное будущее, когда мы обнаружим жизнь на других планетах. Некоторые планеты (в особенности на орbitах вокруг так называемых красных карликов, значительно меньших, чем другие холодные звезды) «застревают» в одном положении относительно своей звезды и потому постоянно обращены к ней только одной стороной: в одном полушарии таких планет царит нескончаемый день, а в другом — вечная ночь<sup>49</sup>. Если бы формы жизни на подобной планете имели оснащенный нейронной сетью мозг, хотя бы отдаленно напоминающий наш, можно было бы предположить, что жители дневной стороны могут обладать зрением, подобным нашему, но без способности видеть сны. Такое же предположение резонно сделать относительно планет с очень высокой скоростью вращения: если ночное время на них длится меньше времени кортикалного захвата, сон со сновидениями их обитателям не нужен. Пройдут тысячи лет, и мы, вероятно, узнаем точно и окончательно, составляем ли мы, человечество, с нашим даром видеть сны, так сказать, вселенское меньшинство.

## Что снаружи, то и внутри

Большинство посещающих Трафальгарскую площадь в Лондоне, желаю взглянуть на величественную колонну Нельсона, едва ли задумываются о том, как искажена соматосенсорная кора в левом полушарии доблестного адмирала. А вообще-то должны бы. Ибо в этом вынужденном непорядке находит отражение один из самых впечатляющих

## Живой мозг

трюков мозга: способность оптимально кодировать тело, отданное ему в попечение.

Как мы уже уяснили, всякое изменение входных сенсорных сигналов (как бывает при ампутации конечности, слепоте или глухоте) ведет к крупным кортикалым реорганизациям. Хранящиеся в мозге карты тела не закреплены генетически, а наоборот, прорисовываются в соответствии с входящей информацией. Эти карты опытозависимы. Они не есть результат заранее прописанного в генах всеобщего плана, а складываются под действием приграничных конкурентных войн и переделов кортикалной территории. И поскольку между нейронами, которые возбуждаются одновременно, возникает прочная связь, их коактивация задает конфигурацию участков, отданных под те или иные кортикалые представительства. Какова бы ни была форма вашего тела, каким бы переменам ни подвергалась, в конце концов она будет в точности картирована на поверхности мозга. В эволюционном плане такие механизмы, зависящие от активности, позволяют быстро проверять естественным отбором бесчисленное множество типов телосложения — от когтей до перьев, от крыльев до цепких хвостов. Природе нет нужды генетически перечерчивать мозг всякий раз, когда она проводит ходовые испытания новых телесных форм; все, что надо, — позволить ему самому подстроиться к переменам. Это соображение подчеркивает главный момент, красной нитью вплетенный в содержательное полотно данной книги: живой мозг очень отличается от цифровой вычислительной машины. Продвижение вглубь нейронных просторов заставит нас отказаться от понятий традиционной инженерной науки и пошире раскрыть глаза.

Любые изменения форм тела, в каком бы его уголке они ни осуществлялись, иллюстрируют происходящее во всех сенсорных системах. Мы уже знаем, что, когда человек рождается незрячим, его зрительная кора настраивается на слух, осязание и прочие чувства. В плане восприятия последствия такого кортикалного захвата оборачиваются повышенной чувствительностью: чем больше кортикалной территории отдано под решение задачи, тем с лучшим качеством она выполняется.

Помимо всего прочего, мы открыли для себя, что, если человеку с нормальной зрительной системой временно перекрыть зрительное восприятие повязкой на глазах, его первичная зрительная кора будет активироваться, когда он станет выполнять какие-либо операции пальцами, а также слушать звуки разной тональности или речь. Если повязку через короткое время снять, зрительная кора быстро возвратится в исходное состояние и начнет реагировать только на входные визуальные

### Глава 3. Внутреннее как зеркало внешнего

сигналы. Как мы увидим в следующих главах, внезапно открывающаяся способность мозга «видеть» пальцами и ушами опирается на связи, проложенные в зрительную кору от других органов чувств, причем эти связи изначально присутствуют в мозге, но бездействуют во время поступления сигналов от глаз.

Сказанное в целом подводит нас к предположению, что зрительные сновидения — это побочный продукт конкуренции нейронов и осевого вращения нашей планеты. Организм, желающий оградить свою зрительную систему от захвата другими чувствами, должен выработать способ поддерживать ее в активном состоянии, когда темнота перекрывает ей поток входной информации от глаз.

Вот теперь мы созрели для следующего вопроса. Нам уже ясно, что кора мозга обладает чрезвычайной гибкостью. Но каковы пределы этой гибкости? Можно ли поставлять мозгу данные самых разных типов? Сможет ли он с легкостью сам догадаться, как использовать данные, которые к нему попали?

# ГЛАВА 4

## ЧТО В НЕГО НИ ПОСТУПАЕТ, ВСЕ ОН, УМНИЦА, ПОСТИГАЕТ

Любой человек может, будь на то его желание, стать скульптором собственного мозга.

Сантьяго Рамон-и-Кахаль (1852–1934),  
испанский нейробиолог, нобелевский лауреат

Майкл Хорост от рождения страдал тугоухостью, но в молодые годы вполне обходился слуховым аппаратом. До тех пор, пока в один не очень прекрасный полдень не обнаружил, что батарейка в его аппарате совсем иссякла. Так он, во всяком случае, подумал. Батарейку Майкл заменил, однако звуки внешнего мира все равно не достигали мозга внутреннего. Он тотчас же поехал в ближайший пункт скорой помощи, где и обнаружилось, что остатки его слуха — тоненькая звуковая ниточка, всю жизнь связывавшая его с окружающим миром, — почили в бозе, окончательно и безвозвратно<sup>1</sup>.

Это означало, что слуховые аппараты ему больше не помогут: подобные устройства улавливают акустические сигналы и усиливают их громкость при передаче недужной слуховой системе. Для некоторых типов тугоухости такая стратегия действенна, но при условии, что остальные звенья системы, следующие за барабанной перепонкой, работают нормально. Если внутреннее ухо поражено и не выполняет свои функции, никакое усиление звука не поможет. Именно это произошло с Майклом. Все указывало на то, что он навеки рас простился со способностью воспринимать звуковую картину мира.

Однако позже Майкл все же нашел еще одну возможность восстановить слух. Взвесив все за и против, в 2001 году он решился на операцию по вживлению кохлеарного имплантата. Это крошечное устройство

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

обходит поврежденную часть внутреннего уха, чтобы напрямую передавать сигнал функционирующему нерву (представьте его как кабель передачи данных). По сути, это мини-компьютер, устанавливаемый во внутреннее ухо; звуковая информация из внешнего мира поступает на микрофон, а от него посредством крошечных электродов передается слуховому нерву.

Таким образом удается обойти поврежденное внутреннее ухо, но это вовсе не значит, что опыт акустического восприятия приобретается без труда. Майклу после имплантации пришлось учиться распознавать незнакомый язык электрических сигналов, поступающих в его слуховую систему:

«Когда через месяц после операции впервые включили имплантат, первые обращенные ко мне слова для меня звучали так: “Ззззззззз ззз сзвиззз тр звфзззззз?” Мой мозг постепенно учился истолковывать эти чуждые моему пониманию звуки. Прошло немного времени, и прежняя абракадабра “Зззззззз ззз сзвиззз тр звзззззз?” превратилась в “Что ты ел на завтрак?” и стала понятна мне. Несколько месяцев практики, и я снова мог пользоваться телефоном и даже поддерживать разговор посреди гомона в баре или кафетерии».

Хотя на первый взгляд идея вживить в тело мини-компьютер кажется немного фантастической, кохлеарные имплантаты представлены на рынке с 1982 года, и более полумиллиона людей уже носят в своих головах эту бионику, радуясь звукам голосов, скрипу дверей, смеху и мелодиям из музыкальных автоматов. Программное обеспечение кохлеарного имплантата поддается как взлому, так и обновлению, поэтому Майкл потратил годы, чтобы получать с его помощью информацию и обходиться без нового хирургического вмешательства. Почти через год после активации имплантата Майклу удалось разработать программу с вдвое большим разрешением. Как он выразился, «если у моих друзей слух с годами неизбежно снизится, то мой только улучшится».

\*\*\*

Терри Биланд живет неподалеку от Лос-Анджелеса. Ему диагностировали пигментный ретинит — дегенеративное заболевание сетчатки (это тонкий слой фоторецепторов на дне глаза). Вот как он отреагировал на страшную новость: «Самое последнее, что бы ты хотел узнать о себе в свои 37 лет, — это что ты слепнешь, а медицина в твоем случае бессильна»<sup>2</sup>.

Но потом Терри выяснил, что выход у него все-таки есть, если только ему достанет смелости воспользоваться им. И в 2004 году он стал одним из первых пациентов, которым провели экспериментальную процедуру по имплантации ретинального бионического чипа (это крошечное устройство с электронной схемой устанавливается по центру сетчатки с внутренней стороны глаза). К чипу по беспроводной связи поступает сигнал от встроенной в специальные очки видеокамеры. Электроды передают слабые электрические разряды неповрежденным клеткам сетчатки, благодаря чему в прежде пустынном канале зрительного нерва генерируются сигналы. Зрительный нерв Терри не был поврежден, и пускай фоторецепторы в его сетчатке погибли, сам нерв по-прежнему жаждал сигналов, которые мог бы передавать в мозг.

Операцию по пересадке миниатюрного чипа провела команда специалистов из Южнокалифорнийского университета. Сама операция прошла без сучка и задоринки, главное испытание началось позже. Исследователи не без внутреннего трепета включали электроды один за другим. Позже Терри рассказывал: «Так здорово было увидеть хоть что-то. Они по очереди проверяли электроды, и вроде как световые пятнышки вспыхивали — маленькие такие, даже меньше, чем десятицентовик<sup>\*</sup>.

В первые дни глаза Терри улавливали только крошечные пятна света — нельзя сказать, чтобы такой успех окрылял. Однако постепенно зрительная кора приспособилась извлекать из поступающих к ней сигналов более понятную информацию. Через какое-то время Терри уже мог определить, что рядом с ним его восемнадцатилетний сын: «Сын шел рядом, мы гуляли... Я-то помнил его еще пятилетним мальчиком и вот в первый раз с тех пор снова его видел. И не постыжусь признаться, что кое-кто в тот день даже немножко пустил слезу».

Четкая визуальная картинка у Терри не возникала; скорее он видел просто сетку из световых точек. Но, и это самое важное, теперь перед ним широко распахнулись заточавшие его во тьме двери. Со временем мозг научился лучше распознавать поступающие в зрительную кору сигналы. Мужчина не мог разглядеть отдельные черты лица человека, но общее впечатление о его внешности, пускай и смутное, все же складывалось. Хотя у ретинального чипа Терри степень разрешения невысока, ее хватает, чтобы дотронуться до расставленных в случайном порядке предметов в помещении, а на улице разглядеть белые полосы пешеходной зебры и самостоятельно перейти дорогу<sup>3</sup>. Терри с гордостью рассказывает: «У себя дома или в гостях я могу войти в любую комнату

---

\* Диаметр монеты — 17,91 мм. Прим. пер.

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

и включить люстру или различить проникающий через окно свет. А идя по улице, не натыкаюсь на низко свисающие ветви: я вижу их края, вот и обхожу» (рис. 4.1).

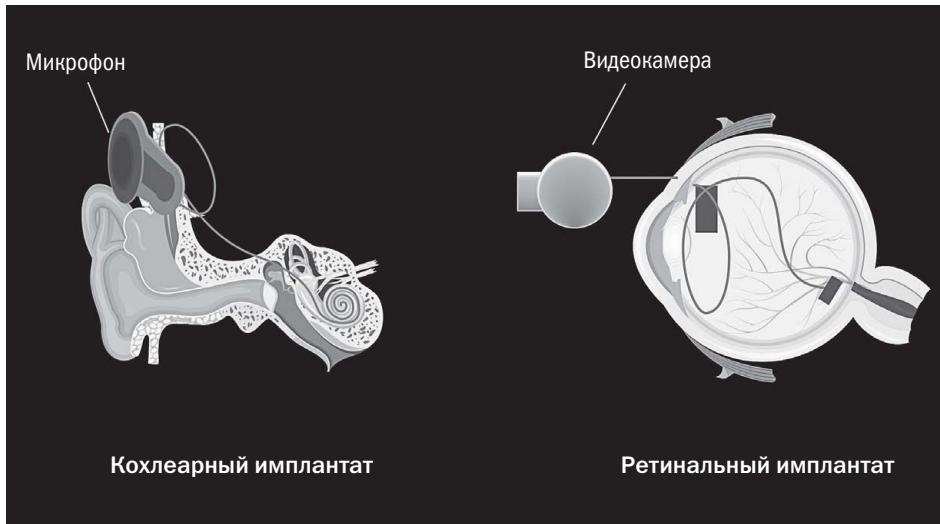


Рис. 4.1. Эти цифровые устройства отправляют мозгу информацию на языке, несколько не совпадающем с естественно биологическим, к которому привычен мозг. Тем не менее мозг ухитряется сообразить, как воспользоваться этой информацией

Идея протезирования слуха и зрения десятилетиями всерьез обсуждалась в научном сообществе. Однако никто всерьез не рассчитывал, что подобного рода технологии могут дать желаемый эффект. В самом деле, внутреннее ухо и сетчатка глаза обрабатывают входные сенсорные сигналы поразительно сложными и изощренными способами. Сумеет ли остальная часть мозга расшифровать и понять сигналы, поступающие от микроскопического электронного чипа, который изъясняется на диалекте Кремниевой долины вместо родного для наших органов чувств языка биологии? Или, наоборот, нижележащие нейронные сети воспримут посылаемые чипами паттерны слабых электрических вспышек как полнейшую тарабарщину? Так недалекий умом чужестранец упорно выкрикивает что-то на своем языке в глупой надежде, что окружающие в конце концов поймут его вопли.

Как ни удивительно, в случае с мозгом такая топорная стратегия срабатывает: обитатели этой страны научаются понимать язык незнакомца.

Но как?

## Живой мозг

Ключ к пониманию данного феномена упрятан в мозге уровнем ниже: ваши полтора килограмма мозговой ткани не в прямом смысле слышат и видят звуки и образы внешнего мира. Напомню, эти полтора килограмма навеки заключены в безмолвных потемках черепа и умеют распознавать лишь электрохимические сигналы, потоками притекающие через различные каналы передачи данных. Ни с чем другим, кроме этих сигналов, мозг дела не имеет.

Нам еще предстоит изучить, как это происходит и почему, но мозг наделен уникальным даром принимать такие сигналы и искусно извлекать из них паттерны. И приписывать им смыслы. Из этих смыслов выстраивается ваш субъективный опыт. Мозг — это орган, который в своей кромешной тьме преобразует электрохимические разряды в красочное шоу на подмостках вашего мира. Буйство красок и переливы ароматов, эмоции и ощущения — все кодируют триллионы деловито снующих в кромешной тьме сигналов, точно так же, как вереницы скучных нулей и единиц кодируют в мозге компьютера роскошную картинку-заставку.

## Мистер Картофельная Голова и его стратегия завоевания планеты

Представьте, что вы попали на остров, все обитатели которого слепы от рождения и не знают, что такое видеть. Зато все умеют читать по Брайлю и считывать кончиками пальцев входные сигналы в виде крохотных символов из выпуклых точек. Касаясь этих малюсеньких бугорков, они разражаются смехом или заливаются слезами. Но разве возможно вместить всю эту гамму эмоций в кончики пальцев? И вот вы пытаетесь растолковать островитянам, что при чтении хорошей книги вы направляете пару сферических органов, которые размещаются у вас на лице, на ряды символов из палочек и закорючек. Эти органы, говорите вы, изнутри выстланы клетками, которые фиксируют столкновения с фотонами, благодаря чему вы распознаете форму подобных символов. А до этого вы заучили набор правил, какими условными символами обозначаются те или иные звуки. При виде каждого символа вы мысленно произносите короткий звук, представляя, что услышите именно его, если кто-то произнесет этот звук вслух. Возникший таким образом паттерн нейрохимической сигнализации и определяет, развеселитесь вы или загрузите. И вы будете не вправе винить этих людей за то, что им трудно понять ваши разъяснения.

Логика в конце концов приведет вас с островитянами к пониманию простой истины: кончик пальца, как и глазное яблоко, представляет собой периферическое устройство, которое преобразует поступающую из окружающего мира информацию в электрические импульсы в нервах. А мозг берется за нелегкий труд их интерпретации. И вы придете к общему согласию, что все в конечном счете упирается в эти самые импульсы, триллионами снующие туда-сюда по мозгу, и что сам способ подачи входных сигналов не имеет значения.

Словом, какую информацию ни загружай в мозг, он обязательно приспособится к ней и научится извлекать из нее все, что может. Если входные данные структурированы и кодируют некое важное сведение об окружающей реальности (а также отвечают еще ряду требований, о которых пойдет речь в главе 5), мозг, будьте уверены, догадается, как его раскодировать (рис. 4.2).

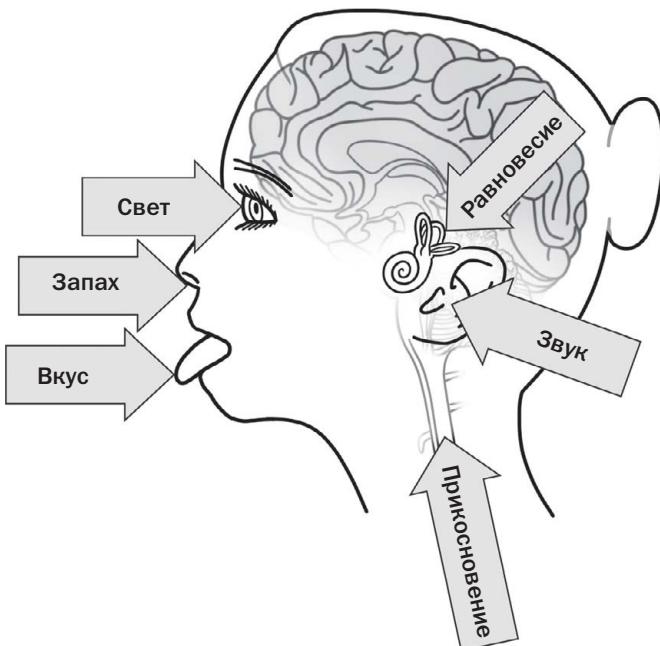


Рис. 4.2. Органы чувств питают мозг из многих источников информации

Из сказанного выше проистекает любопытный вывод: мозг не знает — да ему это и неважно, — откуда к нему поступают данные. Какого бы рода ни была информация, он всегда сообразит, как извлечь из нее смысл и пользу.

## Живой мозг

Благодаря этому мозг относится к разряду машин с очень высокой эффективностью. В сущности, это универсальное вычислительное устройство. Мозг усваивает любые доступные ему сигналы и определяет — почти оптимально, — что с ними можно сделать. Данная стратегия, как я полагаю, развязывает руки Матушке-природе, позволяя экспериментировать с разнообразными каналами ввода данных.

Я называю это свойство мозга моделью эволюции имени мистера Картофельная Голова. И не случайно выбрал для метафоры такую игрушку — пластиковую картофелину, которой можно придать любой облик с помощью прилагающегося к ней набора ручек-ножек, фрагментов лица и разнообразных аксессуаров. Мне хотелось подчеркнуть, что наши органы чувств (глаза, уши, подушечки пальцев) — всего лишь периферические устройства типа plug-and-play («подключи и пользуйся»). Стоит только пожелать, и они тут же к вашим услугам. А мозг догадывается, что делать с поступающими от них сигналами (рис. 4.3).

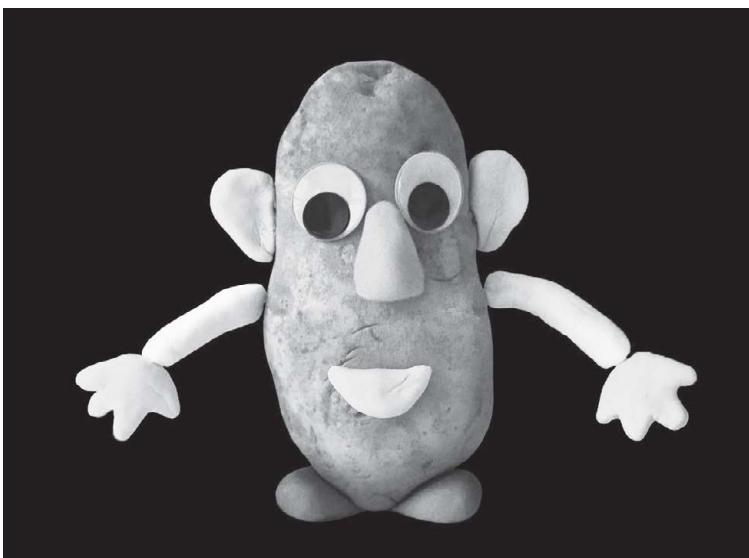


Рис. 4.3. Гипотеза «Мистер Картофельная Голова»: подключи органы чувств, а мозг сам придумает, как их использовать

В итоге Мать-природа может создавать новые типы чувств, просто выстраивая новые периферии. Иными словами, определившись с принципами действия мозга, она может вволю перебирать и пробовать в действии разные виды входных каналов, чтобы подключаться

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

к различным источникам питания в окружающем мире. Информацию, которую несут отраженные электромагнитные волны, улавливают фотонные детекторы в глазах. Колебания воздуха разной частоты (звуковые волны) улавливаются акустическими детекторами ушей. Информацию о температуре и характере поверхностей собирают простыни чувствительной материи, называемой в обиходе кожей. Химические сигнатуры запахов и вкусов вдыхаются через нос ищаются языком. Все это преобразуется в импульсы, проносящиеся по нервным волокнам во тьме черепа.

Поразительная способность мозга принимать любой входящий сенсорный сигнал перекладывает бремя исследования и освоения новых типов ощущений на внешние сенсорные устройства. Как мистеру Кartoшке можно приставить какой угодно нос, или глаза, или рот, так и природа приставляет к мозгу разного рода инструменты для обнаружения источников питания во внешней среде.

Посмотрите на периферические устройства стандарта plug-and-play для вашего компьютера. Чем этот стандарт так важен? Тем, что благодаря ему компьютеру вовсе не обязательно знать о существовании XJ-3000 Super WebCam, которая будет изобретена лет через несколько; ему достаточно, чтобы он был совместим с незнакомым произвольно выбранным устройством и мог получать потоки данных, когда оно будет подключено. Вот почему, когда на рынке появляется очередная периферия, вам нет нужды покупать новый компьютер, а можно спокойно подключить ее к тому, что уже живет у вас дома. Ваш компьютер и есть центральное устройство, порты которого предназначены для стандартного подключения любой периферии<sup>4</sup>.

Догадываюсь, что вам представляется довольно странным рассматривать наши периферические детекторы сигналов как самостоятельные, отдельные от нас устройства. Разве в их создании не поучаствовали тысячи наших генов? И разве эти гены не совпадают с генами в других частях и органах тела? Неужели мы действительно можем рассматривать нос, глаз, ухо или язык как отдельное от нас устройство? Я глубоко исследовал данный вопрос. Ведь если модель имени мистера Кartoшки верна, не порождает ли она предположение, что мы смогли бы отыскать в нашей генетике простые тумблеры-переключатели, которые отвечали бы за наличие или отсутствие у нас какого-то из этих периферических устройств?

Как обнаружилось, не все гены равны. Они распаковываются в восхитительно точном порядке, и экспрессия одного дает толчок экспрессии следующего, подчиняясь изощренно сложному алгоритму прямой

и обратной связи. Таким образом, в генетической программе присутствуют критические узлы для формирования периферии (скажем, носа). И, значит, такую программу можно включить или отключить.

Откуда нам это известно? Посмотрим, какие возникают мутации, когда генетика начинает немного барабанить. Возьмем, например, такую патологию, как аплазия носа (это когда ребенок рождается на свет без носа, то есть на лице нет и следов его присутствия). У младенца Эли, родившегося в 2015 году в Алабаме, нос начисто отсутствует, равно как и носовая полость вкупе с системой обоняния (рис. 4.4)<sup>5</sup>. Информация о подобной мутации ужасает и не укладывается в голове, однако в рамках логики plug-and-play аплазия носа предсказуема: стоило генам легонько дрогнуть, и пожалуйста — периферия просто не выстроилась.



Рис. 4.4. Младенец Эли появился на свет без признаков носа

Если наши органы чувств можно рассматривать как устройства стандарта plug-and-play, значит, допустимо предположить, что имеются случаи, когда младенец рождается без какого-либо органа чувств (скажем, без глаз). И такая патология, называемая анофтальмией, действительно имела место: в 2014 году в Чикаго родился мальчик Джорди с таким дефектом (рис. 4.5)<sup>6</sup>. Под его веками была только гладкая лоснящаяся кожа. Хотя поведение малыша и нейровизуализация указывали, что остальные области его мозга функционируют как полагается, периферические устройства, способные улавливать фотоны, отсутствовали. Бабушка Джорди говорит: «Он будет узнавать нас через осязание». Браиния Джексон, мама мальчика, сделала на правой лопатке татуировку шрифтом Брайля: «Я люблю Джорди», чтобы сын, пока подрастает, обнимая маму, все время осязал ее любовь.

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает



Рис. 4.5. Младенец Джорди родился без глаз; под веками у него только гладкая кожа

Некоторые дети рождаются без ушей. При этой редкой патологии — анатии — у ребенка полностью отсутствует ушная раковина, внешняя часть уха (рис. 4.6).



Рис. 4.6. Ребенок с врожденным отсутствием ушей

Подобным же образом мутация в одном-единственном белке приводит к врожденному отсутствию внутреннего уха<sup>7</sup>. Излишне говорить, что дети с такими генными мутациями абсолютно лишены слуха, поскольку у них отсутствуют периферические устройства, способные преобразовывать колебания волн сжатого воздуха в электрические импульсы.

Можно ли родиться без языка, будучи в остальном практически здоровым человеком? Конечно. Именно такой случай наблюдался в Бразилии у новорожденной девочки по имени Ауристела. С самого рождения дышать, есть и говорить было для нее сущим мучением. Уже во взрослом возрасте Ауристеле сделали операцию, в результате которой она обрела язык.

## Живой мозг

Теперь девушка дает многочисленные интервью, в которых, не жалея драматических красок, описывает, каково ей было расти безъязыкой<sup>8</sup>.

Перечень органов и членов, без которых могут рождаться люди, бесконечен. Так, у некоторых детей на коже и на внутренних органах от рождения отсутствуют болевые рецепторы, что делает их совершенно нечувствительными к несильным мучениям и страданиям<sup>9</sup>. (На первый взгляд может показаться, что свобода от боли дает определенное преимущество. Увы, это не так: тела детей, неспособных чувствовать боль, сплошь покрывают шрамы и рубцы, и часто они умирают в очень молодом возрасте, поскольку не знают, чего именно следует избегать.) Помимо болевых кожа снабжена многими другими рецепторами, в том числе тензорецепторами (рецепторами растяжения), рецепторами зуда, а также терморецепторами. Ребенок может родиться с отсутствием кожных рецепторов одного из этих типов, тогда как остальные рецепторы у него в полном наличии. Отсутствие тех или иных кожных рецепторов носит собирательное название анафия — потеря или ослабление осязания.

Стоит только задуматься об этом скопище всевозможных аномалий, и сразу понимаешь, что наши периферические органы чувств формируются (распаковываются) в силу конкретных генетических программ. Малейший сбой в работе генов может остановить программу, и периферический орган не разовьется, а мозг не будет получать потока сигналов данного типа.

\*\*\*

Идея об универсальности коры головного мозга позволяет предположить, каким образом в процессе эволюции могли добавляться новые сенсорные навыки: при мутации периферического устройства новый поток данных попадает в какой-нибудь участок мозга и запускаются механизмы их нейронной обработки. Таким образом, новые сенсорные навыки всего-то требуют образования новых сенсорных устройств.

Вот почему в животном царстве мы находим богатое разнообразие диковинных периферических устройств, каждое из которых выковывалось миллионами лет эволюции. Будь вы змеей, ваша последовательность ДНК скомандовала бы телу распаковать у вас на голове термочувствительные ямки, способные воспринимать инфракрасное излучение. Родись вы рыбой хвостопёй ножетелкой (ее еще называют «черный нож»), буквки в вашем генетическом коде распаковали бы вам особый сенсорный орган — электrorецепторы, улавливающие малейшие возмущения в электрическом поле. Родись вы бладхаундом или поисковой собакой другой породы, ваш генетический код содержал бы указания

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

снабдить вас огромной мордой, густо усеянной обонятельными рецепторами. Или, например, вы могли бы родиться раком-богомолом, и тогда, согласно генетическим инструкциям, обзавелись бы глазами с шестнадцатью типами фоторецепторов. У звездоноса\* кожные нарости на носу наподобие пальчиков, расположенные по 11 штук с каждой стороны, выполняют роль органов осязания и создают в его мозге трехмерную модель системы прокопанных им подземных ходов. Многие птицы, коровы, а также насекомые обладают магниторецепцией, это чувство дает им возможность ощущать магнитное поле Земли, и потому они прекрасно ориентируются в пространстве.

Требовалось ли мозгу каждый раз заново перестраиваться под соответствие каждому из этих разнообразных периферических устройств? Думаю, что нет. На протяжении эволюции случайные мутации приводили к образованию самых необычных органов чувств, и принимающий от них информационные потоки мозг всякий раз сам додумывался, каким образом использовать их. А когда главные принципы действия мозга раз и навсегда установились, природе остается только одна забота — изобретать новые периферийные сенсоры.

Такая точка зрения подсказывает нам интересный вывод: сенсорные устройства, с которыми мы приходим в мир (глаза, носы, уши, языки, кончики пальцев), далеко не исчерпывают всего спектра сенсоров, какими теоретически мы могли бы обладать. Наш конкретный инструментарий просто унаследован нами в результате долгого и прихотливого эволюционного пути.

Однако вполне возможно, что мы совсем не обречены пользоваться только тем набором органов чувств, каким снабдила нас природа. В конце концов, способность мозга извлекать смысл и пользу из поступающих к нему данных самого разного рода намекает нам на предположение довольно неожиданное и где-то даже сумасбродное: какой-либо сенсорный канал мог бы передавать мозгу информацию, которая в норме поступает через другой сенсорный канал. Например: а что, если преобразовать поток данных от видеокамеры в тактильные ощущения на коже? Сумеет ли мозг, хорошенъко подумав, выстроить зрительную картину окружающего мира, просто осязая ее?

Добро пожаловать в мир, что всякой выдумки странней\*\*, — мир сенсорного замещения.

---

\* Звездонос, или звездорыл (лат. *Condylura cristata*) — небольшое млекопитающее семейства кротовых. *Прим. ред.*

\*\* Перефразированная цитата из поэмы Джорджа Байрона «Дон Жуан» (у Байрона: «Но правда всякой выдумки странней»). *Прим. ред.*

## Сенсорное замещение

Сама по себе мысль, что мозгу можно поставлять информацию по неправильным каналам, вероятно, выглядит слишком умозрительной и даже дикой (рис. 4.7). Между тем первая научная статья, где продемонстрировано практическое воплощение этой идеи, уже полвека как опубликована в журнале *Nature*.

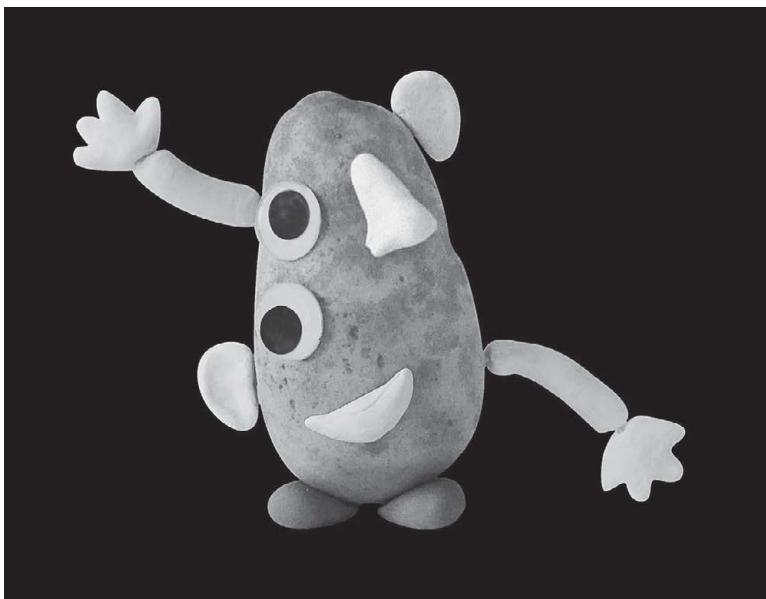


Рис. 4.7. Сенсорное замещение: отправляйте мозгу информацию непривычными для него проводящими путями

Эта история берет начало еще в 1958 году, когда практикующий врач Пол Бах-и-Рита\* получил трагическую весть, что его отца, 65-летнего преподавателя, поразил обширный инсульт. И что отныне он, наполовину парализованный и почти утративший речь, будет прикован к инвалидному креслу. Это был практически приговор, но Пол и его младший брат Джордж, изучавший медицину в Национальном автономном университете Мексики, не пожелали смириться и принялись искать способы помочь отцу. Общими силами они разработали и применили новую уникальную индивидуализированную программу реабилитации.

\* Пол Бах-и-Рита (1934–2006) — американский нейрофизиолог. Наиболее известна его деятельность в области нейропластиичности. Прим. ред.

Как отзывался о ней Пол: «Мы действовали жестоко, но нами двигала любовь. Джордж обычно бросал что-нибудь на пол и просил отца: “Пап, иди подбери”»<sup>10</sup>. Также они занимали его мелкими домашними делами, например давали подметать крыльцо, — под осуждающими взглядами соседей. Тем не менее мучительные старания отца выполнялись эту элементарную работу более чем оправдывали себя. Пол так выразил мнение отца по поводу такой трудотерапии: «Этот никчемный малый хоть на что-то да сгодился».

Жертвы инсульта обычно восстанавливаются лишь частично — а нередко вообще не восстанавливаются, — и потому братья Бах-и-Рита не хотели обольщаться ложными надеждами. Они-то хорошо знали, что если инсульт убил мозговую ткань, то она потеряна безвозвратно.

Между тем отец восстанавливался неожиданно хорошо. Настолько хорошо, что не только вернул себе способность ходить и говорить, но даже возобновил преподавательскую деятельность и прожил дольше, чем можно было рассчитывать (а умер он от сердечного приступа во время очередного похода в горы, на высоте 2700 м над уровнем моря).

Пола глубоко впечатлили масштабы восстановления двигательных функций отца, а накопленный им опыт постинсультной реабилитации ознаменовал крутой поворот в жизни его самого. Он осознал, что мозг способен переучиваться. И даже когда навсегда утрачивает некоторые области, их функции способны брать на себя другие, неповрежденные. Пол оставил профессорскую должность в Научно-исследовательском офтальмологическом институте Смит-Кеттлуэлл в Сан-Франциско и поступил в резидентуру (последипломная больничная подготовка врачей в США) по реабилитационной медицине в Медицинском центре Санта-Клара-Вэлли. Пол намеревался исследовать состояние перенесших инсульт, таких же, как его отец. Мало того, он хотел выяснить, как заставить мозг действовать иначе, чем тот привык.

К концу 1960-х годов Пол Бах-и-Рита уже вовсю работал над собственной схемой реабилитации, хотя большинство коллег считали ее нелепой. В своей лаборатории Пол усаживал незрячего добровольца в переоборудованное стоматологическое кресло, в спинку которого на уровне поясницы была вмонтирована плата из 400 тефлоновых стерженьков конфигурации 20 × 20. Стерженьки могли выдвигаться и втягиваться под действием механических катушек индуктивности (соленоидов). Поверх головы испытуемого устанавливалась видеокамера на треноге. Поступающий от камеры видеопоток преобразовывался в покалывания стерженьков по коже на спине добровольца.

## Живой мозг

Перед камерой перемещали какой-либо предмет, а участник эксперимента должен был внимательно прислушиваться к тактильным ощущениям у себя на спине (рис. 4.8). С течением дней он натренировался лучше различать предметы, руководствуясь ощущениями, которые они вызывали. Это чем-то походило на игру, когда один человек пальцем рисует на спине другого буквы, а тот по форме отгадывает их. Такой чувственный опыт не стал в точности идентичным зрению, но это было только начало.



Рис. 4.8. Входящая видеоинформация трансформируется в прикосновения к спине

Обнаруженный Бах-и-Ритой феномен поразил ученых в его области: оказалось, что незрячие индивиды способны обучиться различать горизонтальные, вертикальные и диагональные линии. А те, кто продвинулся в тренировках дальше, могли научиться различать объекты простой формы и даже лица, причем только на основании покалываний на коже спины. Свои результаты Бах-и-Рита опубликовал в журнале *Nature* и дал статье необычное название «Замещение зрения тактильными проекциями» (*Vision Substitution by Tactile Image Projection*). Так было положено начало новой эре — эре сенсорного замещения<sup>11</sup>. Бах-и-Рита сформулировал свои выводы просто: «Мозг способен использовать поступающую от кожи информацию, как если бы она поступала от глаз».

Затем Бах-и-Рита с сотрудниками решительно улучшили методику простым изменением: если раньше видеокамера размещалась на подголовье кресла, то теперь незрячему пользователю разрешили

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

самостоятельно направлять ее объектив и выбирать, на что смотреть «глазу»<sup>12</sup>. Почему? Потому что сенсорные сигналы лучше всего усваиваются, когда человек активно взаимодействует с окружающей средой. Предоставив пользователям возможность самим управлять камерой, Бах-и-Рита со товарищи позволили замкнуться петле между мускульным актом и входящей сенсорной информацией<sup>13</sup>.

Восприятие можно рассматривать не как пассивный, а, наоборот, как активный способ исследования окружающей обстановки, связывающий определенное действие с конкретным изменением в картине, которая в итоге возвращается в мозг. Ему неважно, как устанавливается эта петля — действием ли глазодвигательных мышц или мышц руки, держащей камеру. Как бы это ни происходило, задача мозга — увязать двигательную реакцию с входящими сигналами.

Вследствие этого пользователи методики приобретали субъективный опыт, осознавая, что зрительные образы на самом деле располагаются «где-то снаружи», во внешней среде, а не на коже спины<sup>14</sup>. Иными словами, данное ощущение было похоже на зрение. Даже притом что вид вашего друга, замеченного вами в кофейне, воздействует непосредственно на ваши фоторецепторы, вы не воспринимаете это так, будто сигнал располагается у вас в глазах. А понимаете, что друг *где-то снаружи* и с расстояния машет вам рукой. Точно так же «зрительные» образы воспринимались пользователями зубоврачебного кресла в новом варианте.

Устройство Бах-и-Риты первым попало в поле зрения публики, но на самом деле это была не первая попытка сенсорного замещения. Еще в 1890-х годах польский офтальмолог Казимир Ноишевский разработал для слепых прибор Elektroftalm — электрофталм, или электрический глаз (от греч. «электричество» + «глаз»). На лоб незрячему человеку помещали фотоэлемент (рис. 4.9), и чем больше света на него попадало, тем громче звучал сигнал в ухе. Исходя из громкости звука, незрячий мог различать в окружающем пространстве освещенные и темные участки.

К сожалению, прибор Ноишевского был громоздок, тяжел и имел разрешение всего в один пиксель, из-за чего не получил практического применения. Но к 1960 году польские коллеги подхватили эстафету Ноишевского и продвинули его изобретение на шаг вперед<sup>15</sup>. Понимая, насколько важен для незрячих слух, они решили транслировать информацию не через ухо, а через прикосновения. Была разработана система вибрирующих моторчиков, устанавливаемых на шлем, который «рисовал» зрительные образы на коже головы. Незрячие участники испытаний

## Живой мозг

могли передвигаться по специально подготовленным помещениям, где дверные проемы и выступающие углы и ребра предметов обстановки для большей контрастности были обведены краской. Это срабатывало. Но, увы, прибор, как и его предшественники, был тяжелым и раскалялся во время работы, однако сам принцип он доказал.

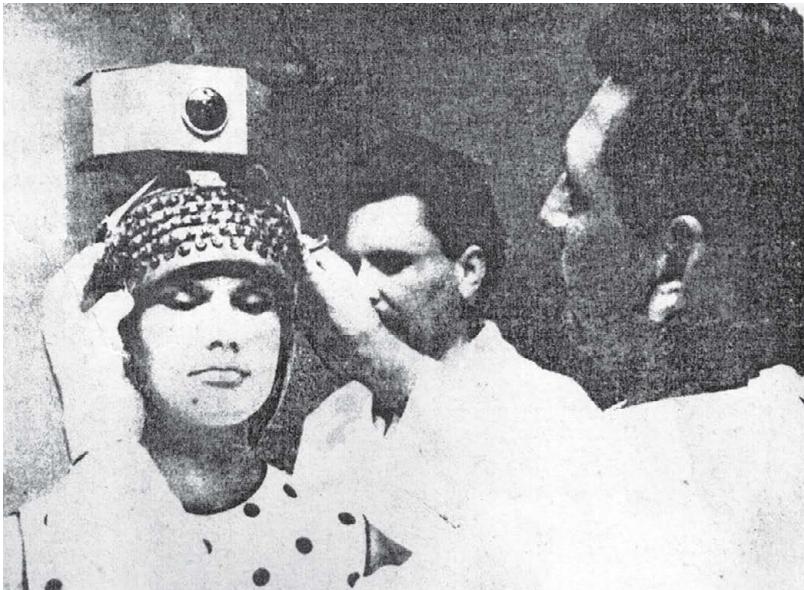


Рис. 4.9. Электрофальм преобразовывал запечатленный камерой образ в вибрации на коже головы (1969)

Спрашивается, почему эти диковинные подходы оказались эффективными? Да просто потому, что поступающие в мозг данные — фотоны через глаза, колебания сжатого воздуха через уши или давление стерженьков на поверхность спины — преобразуются в знакомые, привычные мозгу электрические импульсы. Во всех случаях, когда они несут информацию о каких-то важных особенностях окружающей обстановки, мозг обязательно выучивается интерпретировать их. Обширным нейронным лесам в мозге неважно, какими маршрутами прибывают в них импульсы. Бах-и-Рита довольно образно описал это в интервью, данном в 2003 году общественному телеканалу PBS:

«Если я смотрю на вас, ваше изображение не проникает дальше моей сетчатки. От сетчатки и далее к мозгу, ко всем остальным его отделам, передаются только импульсы по нервным путям. Эти

импульсы ничем не отличаются от тех, что проходят вдоль большого пальца ноги. Те тоже несут такую же информацию и тоже имеют частоту и паттерны. Если можно было бы натренировать мозг извлекать информацию такого рода, то глаза для того, чтобы видеть, уже не требовались бы».

Иными словами, кожа стала проводящим путем для поставки информации в мозг, лишившийся нормально функционирующих глаз. Но как такое могло произойти?

## Трюк на все случаи жизни

Кора головного мозга выглядит примерно одинаково на всем протяжении своих холмов и долин. Но если применить нейровизуализацию или погрузить в желеобразную ткань мозга крохотные электроды, обнаруживается, что в разных областях коры таятся разные типы информации. Эти различия позволили нейробиологам классифицировать области мозга по их специализации. Так сказать, навесить на каждую свой ярлычок: эта область отведена под зрение, та — под слух, а вон тот участочек — под прикосновения к большому пальцу левой ноги. Но что, если эти области стали тем, чем стали, в силу лишь специфики входных сенсорных данных? Что, если «зрительная» кора только потому зрительная, что к ней поступает зрительная информация? Что, если специализация формируется особенностями входных информационных каналов, а не генетической заданностью кортикальных модулей? В рамках такой логики кора представляет собой универсальную машину обработки данных. Введите информацию, и кора не только ее обработает, но и вытащит из нее статистические закономерности<sup>16</sup>. Проще говоря, кора жаждет получать информацию, и в каком бы виде ни поступали данные, вычислительные кортикальные мощности применяют к ним одни и те же алгоритмы. В этом смысле ни одному участку коры изначально не предписано конкретное назначение, например служить зрительной корой, слуховой или какой-либо еще. Значит, независимо от того, желает ли организм воспринимать акустические волны или фотоны, от него требуется только одно: подключить к коре подающие входной сигнал пучки нервных волокон, а шестислойный вычислительный механизм коры запустит очень общий алгоритм и извлечет правильный тип информации. Специализацию участку коры назначает тип поступающих к ней данных.

Вот теперь понятно, почему неокортекс\* на всем своем протяжении выглядит одинаково: неокортекс и есть везде одинаковый. Каждый клочок кортикальной территории обладает плюрипотентностью, это означает, что в нем заложены возможности дифференцироваться в разнообразные по назначению типы коры, а в какой конкретно тип он разовьется, зависит от того, что к нему подключено.

Следовательно, если в коре имеется отвечающий за слух участок, то это только потому, что определенное периферическое устройство (в данном случае уши) посыпает входные сигналы по нервным путям, которые ведут именно в этот участок. Он функционально является слуховой зоной не в силу абстрактной необходимости, а лишь потому, что такую судьбу ему определили сигналы, поступающие по восходящим нервным путям от ушей. Представим, что в альтернативной вселенной к этому участку подключены нервные волокна, передающие зрительную информацию; тогда в наших учебниках эта зона коры будет обозначена как зрительная. Иными словами, кора выполняет стандартные операции с любой поступающей к ней информацией. По первому впечатлению, сенсорные поля в мозге заранее распределены, но на самом деле их определяют получаемые данные<sup>17</sup>.

В центральных штатах США рыбные рынки располагаются в городах, где процветает пекетарианство (отказ от употребления мяса теплокровных животных). Здесь на каждом углу встретишь суши-рестораны, где помимо прочего изобретают новые рецепты блюд из морепродуктов, — условно назовем эти города первичной рыбальной корой.

Давайте поразмышляем, почему их география сложилась именно в такую конфигурацию, а не какую-либо иную? А потому, что здесь протекает много рек и в них много рыбы. Представим, что это не рыба, а биты информации, которые текут по информационным каналам (их роль в данном случае играют реки) в города, где само собой формируется распределение этих данных по функциональным полям — рыбным ресторанам. Заметьте, никакой законодательный орган не предписывал рыбным рынкам стянуться именно в эту часть страны, они сами собой грядьями наросли здесь.

---

\* Неокортекс (лат. neocortex) — верхний слой полушарий мозга. Эволюционно самые молодые области, которые у высших млекопитающих составляют основную часть коры. Неокортекс отвечает за высшие нервные функции — сенсорное восприятие, выполнение моторных команд, осознанное мышление, речь у людей. Состоит из шести слоев нейронов, которые объединяются в своеобразные вертикальные популяции, так называемые колонки кортекса. Прим. ред.

Из сказанного можно вывести гипотезу, что участок мозговой ткани (допустим, в слуховой коре) не представляет собой нечто особенное. Значит ли это, что можно отсечь у эмбриона кусочек слуховой коры и пересадить его в кору зрительную, где он будет функционировать, как полагается последней? Безусловно. Именно это продемонстрировали эксперименты на животных, проводившиеся в начале 1990-х годов: в кратчайшее время после операции пересаженная ткань уже выглядела и функционировала точно так же, как остальная зрительная кора<sup>18</sup>.

Затем ученые еще на шаг продвинулись в демонстрации возможностей коры. В 2000 году исследователи из Массачусетского технологического института перенаправили восходящие нервные пути от глаз хорька в слуховую кору, в результате чего она стала получать *зрительные* данные. К чему это привело? Слуховая кора скорректировала свои нейронные связи так, что они стали похожи на связи, характерные для первичной зрительной коры<sup>19</sup>. Животные с такими переподключенными нейронными связями воспринимали входящие в слуховую кору сигналы как нормальное зрение. Отсюда делаем вывод: судьбу коры определяют паттерны входных сигналов. Мозг гибко монтирует свою сеть, чтобы наилучшим образом представлять (и в конечном счете использовать как руководство) любые данные, какие ему доведется получить (рис. 4.10)<sup>20</sup>.



Рис. 4.10. Зрительные нервные волокна в мозге хорька были перенаправлены в слуховую кору, после чего она начала обрабатывать зрительную информацию

Сотни исследований пересадки кортикальной ткани и переподключения входных сигналов подтверждают правоту модели, рассматривающей мозг как универсальное вычислительное устройство — машину,

## Живой мозг

которая производит стандартные операции с притекающими данными, будь то вид резвящегося на лужайке кролика, звук телефонного звонка, вкус арахисового масла, запах салями или прикосновение шелка к щеке. Мозг анализирует поступившие данные и помещает в контекст «что я могу с этим сделать?». Вот почему незрячemu могут быть полезны входные данные, даже когда они поступают от прикосновений к спине, от ушей или со лба.

\*\*\*

В 1990-х годах Бах-и-Рита с коллегами задумали сконструировать устройство для незрячих габаритами поменьше, чем громоздкое стоматологическое кресло, и разработали совсем маленький прибор, который назвали BrainPort<sup>21</sup>. На лоб слепому человеку помещают видеокамеру, сигналы от которой в виде электрических импульсов передаются в помещаемую на язык плату с электродами размером чуть более 3 см<sup>2</sup> — «наязычный дисплей» (Tongue Display Unit, TDU) (рис. 4.11).

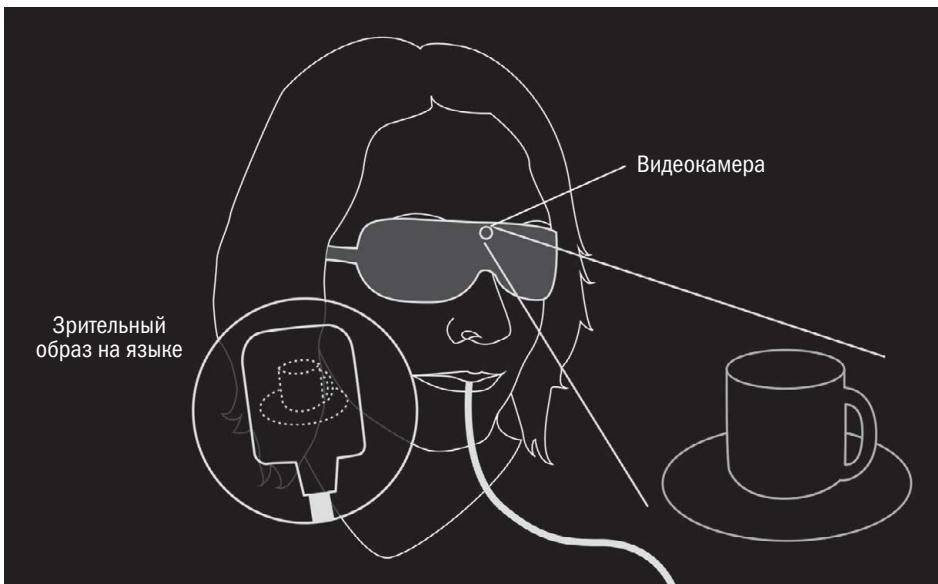


Рис. 4.11. Зрение посредством языка

Электроды создают слабые разряды тока, коррелирующие с расположением пикселей, а язык ощущает покалывания, как от взрывной карамели-шипучки Pop Rocks (другая аналогия — пузырьки шампанского). Яркие пиксели кодируются в виде сильных покалываний

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

в соответствующих точках на языке, пиксели побледнее — как покалывания умеренной силы, а черные не производят вообще никакого воздействия. BrainPort позволяет различать визуальные объекты с оптической резкостью примерно в 20/800 остроты зрения<sup>22</sup>. Пользователи говорят, что сначала воспринимают стимуляции как хаотичное смешение неузнаваемых краев и форм, но потом начинают распознавать их, что позволяет оценить расстояние между предметами, их форму, направление движения и размер<sup>23</sup>.

Мы воспринимаем язык прежде всего как орган вкуса, но не будем забывать, что он усеян множеством тактильных рецепторов (это они позволяют вам воспринимать текстуру пищи) и потому может служить превосходным машинно-мозговым интерфейсом<sup>24</sup>. Электродная плата на языке, как и другие визуально-тактильные устройства, напоминает нам, что зрение возникает не в глазах, а в мозге. При визуализации мозга у натренированных индивидов (слепых или зрячих) изменения электротактильных разрядов на языке активируют зону мозга, которая в норме задействуется для восприятия видимого движения<sup>25</sup>.

Как и в случае с соленоидной решеткой на спине, незрячие пользователи BrainPort со временем начинают чувствовать, что визуальная картинка обладает открытостью и глубиной и что объекты располагаются *снаружи*. Иными словами, их ощущения выходят за рамки осмысливания происходящего на поверхности языка и перерастают в непосредственный опыт восприятия. Оно не описывается в понятиях «я чувствую на языке схему электрических разрядов, в которых закодировано, что “мимо меня прошла моя жена”», а создает непосредственное впечатление, что жена проходит через гостиную. Если у вас нормальное зрение, примите к сведению, что ваши глаза работают точно так же: электрохимические сигналы на сетчатке воспринимаются вами как образ приятеля, который машет вам рукой, образ проносящейся мимо Ferrari или алого воздушного змея на фоне небесной синевы. Даже притом что все это происходит на поверхности ваших сенсорных детекторов, вы воспринимаете это как происходящее *снаружи*. И не имеет значения, выступают ли детектором глаза или язык. Вот как описывает опыт пользования прибором BrainPort незрячий участник испытаний Роджер Бэм:

«Первый раз я пришел сюда в прошлом году, и тогда мы проделывали разные упражнения за столом на кухне. Я немножко разнервничался, потому что на тот момент уже 33 года вообще не видел. И я смог протянуть руку точно в направлении шаров, которые лежали на столе, и видел, что они разного размера. То есть

## Живой мозг

я зрительно воспринимал их. Я видел, куда протянуть руку, чтобы взять шары, — не шарить по столу или чувствовать, где они, а именно взять, и еще видел чашку: я поднял руку и опустил точно на нее»<sup>26</sup>.

Как вы уже догадываетесь, тактильную информацию можно подавать на кожу любого участка тела. Японские ученые разработали свой вариант тактильной платы — налобный, который называется Forehead Retina System (рис. 4.12). Изображение с миниатюрной видеокамеры преобразуется в электрические импульсы и передается в виде точечных раздражений тактильных рецепторов лба, рисуя на нем упрощенный контур изображения<sup>27</sup>. Почему вдруг лоб? А почему бы и нет? Поверхность лба вообще мало для чего используется, вот пусть и послужит.

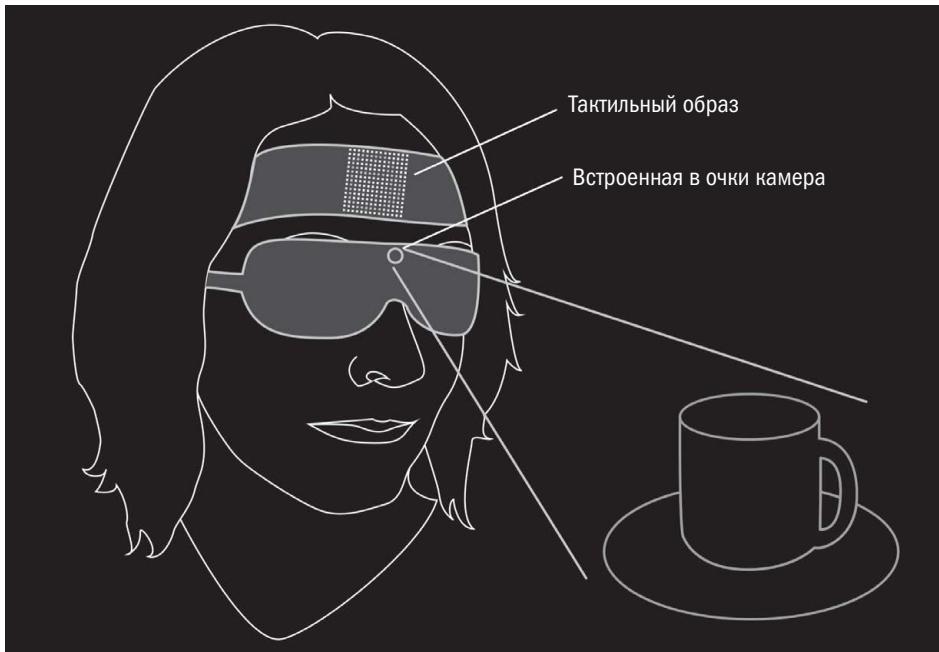


Рис. 4.12. Технология Forehead Retina System

В другой версии этой технологии плата вибротактильного датчика (соленоида) помещается на живот; интенсивность сигнала отображает расстояние до ближайших поверхностей<sup>28</sup>.

Описанные технологии объединены тем, что мозг соображает, как придать смысл визуальным данным, поступающим через входные

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

каналы, которые принято считать тактильными. Но, как выясняется, тактильные ощущения не единственная плодотворная стратегия для создания зрительной картинки у незрячих.

### Видящие уши

Как-то, несколько лет назад, к нам в лабораторию зашел Дон Вон: глаза зажмурены, а в руках прямо перед собой он держит iPhone и начинает расхаживать туда-сюда, при этом ухитряясь не натыкаться на столы, шкафы и прочее, как будто все это видит. Как оказалось, в его уши через наушники-пуговки вливались потоки звуков и усердно преобразовывали визуальную картину окружающей обстановки в звуковой ландшафт. Дон учился видеть помещение ушами. Он плавно водил телефоном из стороны в сторону — словно это был третий глаз или миниатюрная тросточка вроде тех, с какими ходят незрячие, — поворачивал его то в одну сторону, то в другую, вытягивая из пространства нужную ему информацию о расположении предметов. Таким образом мы экспериментально выясняли, может ли незрячий индивид собирать зрительную информацию через уши. Не удивлюсь, если вы не слыхали об этой технологии, разработанной в помощь слепым, но ее идея не нова: исследования в данном направлении начались более чем полвека назад.

В 1966 году профессора Лесли Кей\* пленила красота механизма эхолокации у летучих мышей. Он знал, что некоторым людям тоже дано развить в себе необычный дар ориентироваться в пространстве по отраженным от разных поверхностей звуковым импульсам, однако дело это очень сложное. И Кей сконструировал очки, чтобы незрячие люди смогли воспользоваться преимуществами эхолокации (рис. 4.13)<sup>29</sup>. Правда, довольно громоздкие.

Очки излучали в пространство ультразвук. Благодаря очень малой длине волны ультразвук способен дать информацию о мелких объектах, отражаясь от их поверхностей. Электронная начинка очков улавливала отраженные от объектов волны и преобразовывала в звуковые сигналы воспринимаемой человеческим ухом частоты, причем высота звука указывала расстояние до объекта: высокие звуки обозначали объекты, расположенные в отдалении, низкие — находящиеся вблизи. Габариты объекта передавались через силу звука: громкий звук означал, что

\* Лесли Кей (1922–2020) — британско-новозеландский инженер-электрик, особенно известный разработкой ультразвуковых устройств для помощи слепым. Прим. ред.

## Живой мозг

объект крупногабаритный, негромкий — что мал размерами. Для передачи характера поверхности использовалась чистота звучания: чистый звук означал гладкую поверхность объекта, а если она была грубой и шероховатой, к звукам примешивались шумы. Пользователи устройства научились очень неплохо обходить препятствия, однако ввиду низкого разрешения устройства Кей и его коллеги решили, что их изобретение следует считать скорее помошью, нежели заменой передвижения с собакой-поводырем или с тростью.



Рис. 4.13. Незрячий мужчина в акустических очках Кея, справа (на самом профессоре очки не акустические, а просто с очень толстыми стеклами)

Хотя незрячим индивидам акустические очки Кея могли быть разве что умеренно полезны, открытым оставался вопрос, насколько хорошо могли бы обучиться интерпретировать их сигналы незрячие дети, если учесть поразительную пластичность детского мозга. Продуктивность этой идеи в 1974 году решил проверить психолог Томас Бауэр из Калифорнии, взявший для испытаний модифицированную версию очков Кея. В качестве испытуемого был выбран четырехмесячный младенец с врожденной слепотой<sup>30</sup>. В первый день Бауэр брал предмет и медленно водил им перед носом малыша. Когда он проводил предмет в четвертый раз,

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

глаза ребенка сошлись к переносице, как бывает, если поднести что-то близко к глазам. Бауэр отвел предмет в сторону, и глазки малыша вернулись к нормальному положению. После нескольких циклов такого упражнения младенец при приближении объекта уже поднимал ручонки. Когда находившийся перед ним предмет перемещался вправо или влево, малыш поворачивал вслед за его движением головку и старался ударить по нему ручкой.

В отчете о результатах эксперимента Бауэр упоминает еще несколько форм поведения, отмеченных у маленького испытуемого:

«Младенец с надетым на него устройством лежал лицом к матери, пока та ворковала с ним. Он медленно поворачивал головку в сторону, чтобы удалить ее из звукового поля, затем так же медленно возвращал в прежнее положение, чтобы мать снова оказалась в его звуковом поле. Это действие повторялось несколько раз подряд и сопровождалось широкой, радостной улыбкой ребенка. У всех троих наблюдателей сложилось четкое впечатление, что малыш играет с матерью в своего рода прятки, что доставляет ему огромное удовольствие».

Далее Бауэр сообщает о примечательных результатах, достигнутых в следующие несколько месяцев:

«После этих первоначальных приключений малыш развивался более-менее на одном уровне со зрячими ровесниками. Руководствуясь акустическими подсказками, он, как представлялось, мог узнавать любимую игрушку, не прикасаясь к ней. В возрасте около шести месяцев малыш начал протягивать к предметам обе ручки. А к восьми месяцам уже мог найти предмет, спрятанный за другим предметом. Подобные формы поведения обычно и близко не наблюдаются у младенцев с врожденной слепотой».

Тут вам самое время удивиться, почему вы раньше не слышали, чтобы кто-то пользовался подобным акустическим устройством для слепых. Но, как мы уже видели, технологическое решение имело серьезные недостатки, в частности громоздкость и немалый вес (не такая это была вещь, чтобы, пользуясь ею, ребенок мог расти, не испытывая неудобств), а разрешающая способность оставалась низкой. Кроме того, результаты испытаний акустических очков у взрослых в целом свидетельствовали о меньшем успехе, чем у детей<sup>31</sup> (к этой теме мы вернемся в главе 9).

Таким образом, хотя сенсорное замещение и прижилось в науке, придется подождать, пока для его продуктивного использования сложится правильная комбинация факторов.

\*\*\*

В начале 1980-х годов нидерландский физик Питер Мейер принял эстафету в разработке теории, рассматривающей ухо как средство трансляции мозгу зрительной информации. Эхолокация его не занимала, зато сильно интересовал вопрос, возможно ли преобразовать в звук входной поток видеоданных.

Мейер знал о работах Бах-и-Риты по преобразованию видеоданных в тактильные ощущения, однако небеспочвенно подозревал, что человеческое ухо наделено большей способностью вбирать и усваивать информацию. Его недостатком в данном контексте выступала меньшая интуитивность преобразования зрительных сигналов в слуховые. При использовании устройства на основе стоматологического кресла Бах-и-Риты формы окружности, лица или человеческой фигуры непосредственно прорисовывались на коже и потому были легко распознаваемы. А как преобразовать в звук сотни пикселей изображения?

Тем не менее к 1991 году Мейер разработал версию системы на персональном компьютере, а к 1999 году сконструировал комплект из встроенной в очки миниатюрной камеры и носимого на поясе компьютера. Свою систему он назвал vOICe: все буквы складывались в слово «голос» (англ.), а три средние служили аббревиатурой возгласа Oh, I see! — «О, я вижу!»<sup>32</sup>. Заложенный в систему алгоритм обрабатывал звук по трем измерениям: высоту объекта передавала частота, положение в горизонтальной плоскости передавалось панорамированием стереовхода (представьте, что звук перемещается из левого уха в правое, как если бы вы скользили взглядом, разглядывая картину или сценку), о яркости объекта давала представление сила звука. Система позволяла получить визуальное представление об объекте в градациях серого цвета с разрешением порядка  $60 \times 60$  пикселей<sup>33</sup>.

Попробуем представить опыт эксплуатации таких очков. Сначала мы слышим лишь какофонию звуков. Затем, двигаясь по помещению, — чуждые уху бессмысленные жужжания и завывания. Через некоторое время мы начинаем соображать, как руководствоваться этими звуками, чтобы перемещаться, не налетая на предметы. На данной стадии приходится выполнять когнитивное упражнение: мы с мучительным трудом учимся переводить хаос из разрозненных звуков в подсказки для успешного перемещения.

Важные перемены происходят чуть позже. По прошествии недель или месяцев незрячие пользователи vOICe осваиваются и начинают передвигаться вполне успешно<sup>34</sup>, но не потому, что запомнили значение того или иного звука, — напротив, теперь слепые могут в некотором смысле *видеть*. Они переживают зрительный опыт, используя прибор с необычно низкой разрешающей способностью<sup>35</sup>. Женщина, потерявшая зрение в 20 лет, так описала свои впечатления от применения устройства:

«Недели за две-три у тебя развивается представление о звуковом ландшафте. Примерно месяца через три или около того ты начинаешь видеть нечто вроде вспышек в окружающей обстановке и уже можешь различать предметы, просто глядя на них... Это в общем-то зрение. Я знаю, что такое зрение. Я помню, каково это»<sup>36</sup>.

Решающее значение имеет непрерывная неукоснительная тренировка. Как и в случае с кохлеарными имплантатами, могут потребоваться многие месяцы, прежде чем мозг приспособится извлекать смысл из звуковых сигналов устройства. К этому моменту изменения в мозге уже измеримы методом нейровизуализации. Вполне определенный участок (латеральная затылочная кора) в норме реагирует на информацию о форме предметов, и неважно, определяется ли она зрением или осязанием. После нескольких дней ношения очков этот участок коры начинает реагировать на звуковой ландшафт<sup>37</sup>. Рост эффективности пользования устройством происходит параллельно с масштабами церебральной реорганизации<sup>38</sup>.

Иными словами, мозг придумывает, как извлечь информацию о форме предметов из входных сигналов, по каким бы проводящим путям — через зрение, осязание или слух — они ни поступали в его святая святых. Какой именно орган чувств посыпает их — второстепенная подробность. Самое главное — поступающая в мозг информация.

В первые годы XXI века ряд исследовательских лабораторий начали использовать широкие возможности мобильных телефонов и принялись разрабатывать мобильные приложения, преобразующие входящие визуальные данные в исходящие аудиоданные. Незрячие люди направляют камеру телефона на пространство перед собой, а приложение преобразует зрительную картину в звуковую и транслирует им в наушники. Приложение vOICe, например, можно бесплатно скачать на мобильник в любой точке мира.

Отметим, что vOICe не единственная технология замещения визуальных сигналов звуковыми; в последние годы подобные технологии появляются в изобилии. Например, разработано приложение EyeMusic, которое использует музыкальные тоны для отображения положения объектов в вертикальной плоскости: чем выше располагается пиксель изображения, тем выше музыкальный тон. Для обозначения правого или левого положения пикселя используется временной интервал: ноты, звучавшие раньше, указывают, что объект слева; позже — справа. Система даже умеет передавать цвета через звук разных музыкальных инструментов: белый — звучит вокал, синий — труба, красный — орган, зеленый — дудочка, желтый — скрипка<sup>39</sup>. Применяются также имитирующие эхолокацию технологии, модуляция громкости в зависимости от расстояния до объектов и многие другие идеи<sup>40</sup>.

Повсеместное распространение смартфонов позволило человечеству отойти от громоздких компьютеров и приобрести колossalную вычислительную мощь в кармане. Смартфоны дают не только выигрыш в эффективности и скорости, но и шанс в глобальном масштабе улучшить ситуацию с помощью устройств сенсорного замещения, в особенности с учетом того, что 87% людей с нарушениями зрения проживают в развивающихся странах<sup>41</sup>. Недорогие мобильные приложения для сенсорного замещения можно распространить по всему миру, поскольку это не требует постоянных издержек на производство, физическое распространение или пополнение запасов, как и не вызывает неблагоприятных побочных эффектов. В этом смысле вдохновленный нейробиологией подход можно считать малозатратным, быстро развертываемым и применимым для решения глобальных проблем здоровья человека.

\*\*\*

Если вас удивляет, что незрячие люди могут «прозреть» за счет языка или звуков в наушниках смартфона, вспомните, как они учатся читать шрифт Брайля. Поначалу под кончиками пальцев не чувствуется ничего, кроме странных, хаотически рассыпанных бугорков. Но вскоре хаос перерастает в нечто намного большее: мозг перестает обращать внимание на необычность средства доставки сигналов (осознание выпуклых точек кончиками пальцев) и сосредоточивается на смысле образуемых ими символов. Опыт чтения брайлевского текста аналогичен вашему, когда вы ведете глазами по этим строчкам: хотя буквы имеют произвольную форму, вы обходите стороной частные подробности данного средства передачи информации (форма букв) и напрямую усваиваете смысл нарисованного ими узора.

Новичку, в первый раз применяющему наязычный дисплей или наушники с системой замещения видеоданных звуковыми, требуется переводить входные сигналы в что-то осмысленное: звуки, генерируемые визуальной картинкой (скажем, собакой, входящей в гостиную с косточкой в зубах), мало что говорят о происходящем вокруг. Это аналогично тому, как если бы ваши нервные волокна вдруг начали транслировать мозгу послания на иностранном языке. Но при достаточной практике мозг способен обучиться переводить звуки в зрительные образы. И как только он этому научится, созданная звуками визуальная картинка станет вам понятна и очевидна.

## Эти благословенные вибрации

Принимая во внимание, что примерно 5% населения Земли из-за тяжелой формы тугоухости обречены на инвалидность, ученые несколько лет назад начали плотно изучать генетические корни заболевания<sup>42</sup>. К сожалению, на настоящий момент наука выявила более 220 генов, так или иначе связанных с глухотой. Это большое разочарование для тех, кто надеется на простые способы излечения, хотя удивляться по большому счету нечemu. В конце концов, слуховая система подобна симфоническому оркестру, каждый инструмент которого тонко настроен на гармоничное взаимодействие с остальными. А всякая сложная система подвержена сотням различного рода сбоев. Малейшая неполадка в работе хотя бы одного элемента нарушает функционирование всей системы, из-за чего развивается тугоухость. Многие ученые посвящают себя поиску способов «починки» отдельных элементов слуховой системы. А мы с вами подойдем к проблеме с позиций живой нейронной сети мозга: чем принципы сенсорного замещения могли бы помочь восстановлению способности слышать?

Движимые этой идеей, мы с моим бывшим аспирантом Скоттом Новичем решили придумать устройство для сенсорного замещения слуха. И нацелились сконструировать устройство совершенно незаметное — настолько, чтобы посторонние даже не заподозрили, что оно у вас есть. В этих целях мы использовали ряд достижений из области высокопроизводительных вычислений и получили носимое под одеждой устройство, позволяющее воспринимать звук посредством осязания. Наш сенсорный жилет — Neosensory Vest — улавливает звуки внешней среды и конвертирует их в вибрации, которые передаются на кожу встроенными в жилет моторчиками (рис. 4.14). Это позволяет человеку кожей ощущать звуковую картину окружающей реальности.

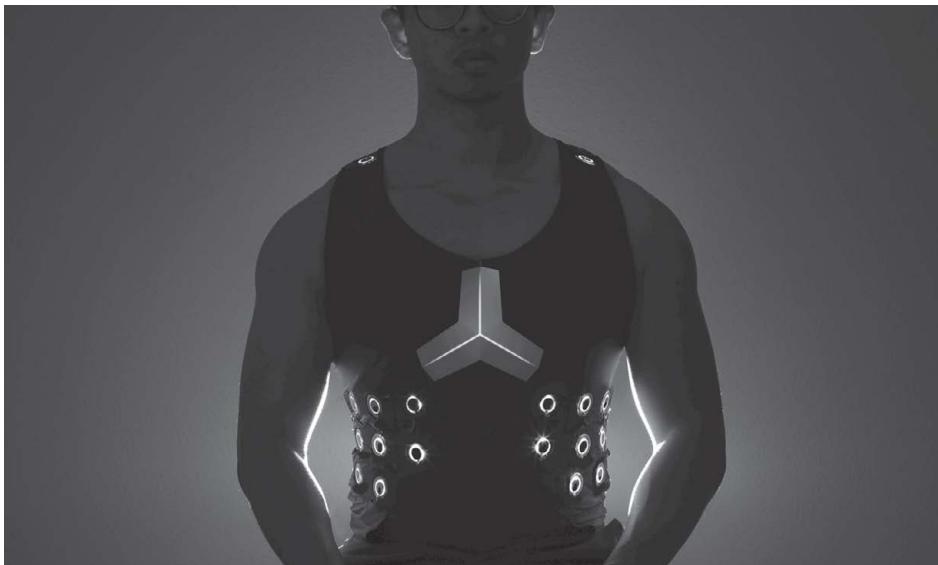


Рис. 4.14. Сенсорный жилет *Neosensory Vest*. Звук передается коже и воспринимается как различимые паттерны вибраций

Если вы не верите, что такой способ может возыметь эффект, напомню, что ровно то же самое проделывает ваше внутреннее ухо: раскладывает звук на частоты (от низких до высоких) и в таком виде сгружает данные мозгу для интерпретации. В сущности, мы всего лишь переместили внутреннее ухо на кожу.

Уму непостижимо, какими изощренными вычислительными возможностями обладает человеческая кожа, однако в современной жизни они мало используются. Если бы какой-нибудь стартап в Кремниевой долине синтезировал подобный материал, за него отвалили бы огромные деньги, хотя он в натуральном виде имеется под одеждой у каждого из нас. Правда, почти все время простояивает без дела. Конечно, задействовать столь чувствительный орган было бы неплохо, но сразу возникает вопрос: достаточно ли широка у него полоса пропускания\*, чтобы передавать звуковую картину во всей полноте. Напомню, что ушная улитка — в высшей степени специализированная структура, ее изысканно-прихотливая форма идеальна для приема и кодирования звука. Кожа,

\* Полоса пропускания (прозрачности) — диапазон частот, в пределах которого амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) акустического, радиотехнического, оптического или механического устройства достаточно равномерна для того, чтобы обеспечить передачу сигнала без существенного искажения его формы. Прим. ред.

в отличие от улитки, предназначена для восприятия воздействий совсем иного рода, а ее пространственное разрешение оставляет желать лучшего. Для передачи на кожу всей полноты информации, которую играючи улавливает внутреннее ухо, потребовалось бы несколько сотен вибrotактильных моторчиков — слишком много, чтобы навесить их на человека. Но за счет сжатия речевой информации можно обойтись менее чем тремя десятками моторчиков. Как это может быть? Суть сжатия речевых сигналов заключается в извлечении максимума смысла из информации любого объема. Возьмем, например, разговор по сотовому телефону: вы что-то говорите, а ваш голос слышит собеседник. Но на самом деле то, что он слышит, совсем не ваш напрямую передаваемый ему голос. Сотовый телефон производит цифровое семплирование, или дискретизацию, вашей речи (через равные промежутки времени берет отсчеты — семплы — аналогового, то есть непрерывного сигнала) 8 тысяч раз за секунду. Затем алгоритмы выделяют из этих тысяч отсчетов важную информацию, и этот сжатый сигнал передается на вышку сотовой связи. Посредством техники сжатия сигнала Neosensory-жилет улавливает звуки и «проигрывает» эту звуковую картину на коже за счет вибрации десятков моторчиков<sup>43</sup>.

Первым участником испытаний Neosensory-жилета стал 37-летний Джонатан с врожденной полной глухотой. На протяжении четырех дней мы просили его надевать жилет и по два часа тренироваться в распознавании набора из тридцати слов. На пятый день Скотт, прикрыв ладонью рот (чтобы нельзя было прочитать по губам), произнес слово «трогать». Джонатан ощутил на коже под жилетом сложный паттерн из вибраций и написал это слово на маркерной доске. Тогда Скотт произнес слово из другой части речи («где»), и Джонатан снова написал его правильно. Итак, он оказался способен раскодировать сложносочиненный паттерн вибраций и понять, какое слово произнесено, причем не в результате сознательного умственного усилия (паттерны вибраций слишком сложны для этого), мозг сам производит раскодирование. Затем мы переключились на изучение следующего набора слов, и Джонатан по-прежнему хорошоправлялся с заданиями, это свидетельствует о том, что он не просто запоминал отдельные конфигурации вибраций, а обучался слышать. Иными словами, если у вас со слухом все в порядке, я мог бы произнести незнакомое вам слово schmegegge (шмеджэдж, то есть полная несуразица), и вы прекрасно различили бы его — не потому, что когда-то слышали и запомнили, а потому, что умеете пользоваться слухом.

Мы разработали наше заместительное устройство в нескольких формах, в том числе как нагрудный пояс для детей (рис. 4.15). Его действие

## Живой мозг

было испытано на группе глухих детей в возрасте от двух до восьми лет. На протяжении всего испытательного периода родители чуть ли не каждый день слали мне видеоролики, демонстрирующие прогресс их малышей. На первых порах было неясно, происходит ли хоть что-нибудь, а потом мы стали замечать, что дети останавливаются и сосредоточиваются, когда кто-то из родных нажимает на клавишу пианино.



Рис. 4.15. Двое малышей используют нагрудный вибрационный пояс

Помимо этого, дети и сами стали произносить больше звуков, поскольку у них впервые в жизни замкнулась петля обратной связи: они издавали некий звук и сразу ощущали входной сенсорный сигнал. Вы наверняка не вспомните, но именно таким образом сами в младенчестве учились пользоваться ушами: лепетали, гулили, хлопали в ладошки или били по деревянным прутьям кроватки — и ощущали обратную связь в этих странных штуках по обе стороны головы. Именно так вы учились расшифровывать входящие звуковые сигналы: сопрягали собственные действия с их последствиями. Теперь представьте, что нагрудный пояс надет на вас самих. Вы громко произносите начало панграмммы (стандартной проверочной фразы «Шустрая бурая лисица...», содержащей все буквы английского алфавита\*) и в тот же момент кожей *ощущаете эти*

\* Полностью панграмма выглядит так: The quick brown fox jumps over the lazy dog — шустрая бурая лисица прыгает через ленивого пса. Прим. пер.

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

слова. Ваш мозг учится связывать звук и тактильное ощущение и понимать непривычный вам язык вибраций<sup>44</sup>. Как мы увидим чуть ниже, лучший способ прогнозировать будущее — самим создавать его.

Кроме того, мы разработали тактильно-звуковой заместитель в виде браслета на запястье (Buzz), у которого всего четыре моторчика. Степень разрешения у него ниже, но для многих людей с учетом их образа жизни он более практичен. Пользователь Филипп рассказал нам о своем опыте ношения браслета Buzz на работе в ситуациях, когда он забывал выключить воздушный компрессор:

«Я по обыкновению оставляю его включенным, пока хожу туда-сюда, и тогда коллеги говорят: “Смотри-ка, ты опять не выключил компрессор”. А теперь я ношу Buzz и чувствую: что-то работает. И сразу проверяю, не включен ли компрессор. И уже сам напоминаю коллегам, что они забыли вырубить его. А они каждый раз искренне удивляются: “Постой, а ты-то откуда знаешь?”»

Филипп сообщает, что может определить, когда лают его собаки, в кране журчит вода, звонит входной звонок или жена зовет его (раньше она никогда не произносила его имя, а сейчас это вошло у нее в привычку). Беседуя с Филиппом через полгода после того, как он начал пользоваться устройством Buzz, я тщательно протестировал его внутренний опыт: воспринимает ли он работу Buzz на своем запястье как вибрации, которые следует расшифровать, или же улавливает звуковые сигналы напрямую? Проще говоря, когда на улице завывает сирена скорой помощи, ощущает ли он это как вибрацию на коже, обозначающую включенную сирену, или же сразу знает, что где-то там к больному спешит скорая помощь. Филипп ясно дал понять, что верен второй вариант: «Я воспринимаю звук, который у меня *в голове*». Точно так же, как вы при виде акробата получаете мгновенное представление, что перед вами акробат (а не оцениваете, какие фотоны уловили ваши глаза), или сразу понимаете, что пахнет корицей (вместо того чтобы сознательно анализировать молекулярный состав химического вещества, раздражающего слизистую вашего носа), так и Филипп слышит окружающую реальность.

\*\*\*

Идея конвертировать звук в тактильное ощущение не нова. В 1923 году психолог из Северо-Западного университета Роберт Голт узнал о слепоглухой десятилетней девочке, утверждавшей, что она может чувствовать звук кончиками пальцев, как Хелен Келлер (1880–1968, американская

писательница и политическая активистка, лишилась зрения и слуха из-за перенесенной в детстве болезни, но научилась полноценно общаться). Не поверив девочке, Голт провел ряд экспериментов. Он затыкал ей уши и плотно оборачивал голову шерстяным одеялом (предварительно удостоверившись на своем аспиранте, что он действительно не слышит ни звука). Девочка клала пальцы на мембрану портофона (устройства для передачи звука), а Голт разговаривал с ней, сидя в шкафу. Девочка могла улавливать звуки его речи исключительно за счет вибраций мембранных, ощущаемых ее пальцами. Вот что сообщает Голт:

«После каждого предложения или вопроса одеяло поднимали и она повторяла ассистенту сказанное мной с незначительными неискажающими смыслом вариациями. Полагаю, мы имеем удовлетворительное подтверждение, что она понимает звук человеческого голоса через ощущаемые кончиками пальцев вибрации».

Голт упоминает также, что его коллега преуспел в передаче звуков речи через четырехметровую стеклянную трубку. Натренированный участник его эксперимента с плотно закупоренными ушами прикладывал ладонь к концу трубы и определял, какие слова были произнесены с противоположного конца. Опираясь на такого рода наблюдения, исследователи попытались сконструировать приборы для преобразования звука в осязательные ощущения, но слишком большие габариты и очень слабая вычислительная мощь тогдашних технических средств не позволили произвести нечто, имеющее практическую пользу.

В начале 1930-х годов педагог одной из школ Массачусетса разработал методику для двух слепоглухих учеников, мальчика и девочки. Для общения им требовалось читать по губам говорящих, что не представлялось возможным, поскольку оба от рождения были еще и незрячими. Методика же предлагала помещать руку на лицо и шею говорящего. Большим пальцем следовало слегка касаться его губ, а остальными пальцами, развернутыми веером, — щеки и шеи, что позволяло чувствовать движение губ, вибрации голосовых связок и даже токи выдыхаемого ноздрями воздуха. Методика получила название Tadoma — Тэд и Ома. Впоследствии этой методике обучили тысячи слепоглухих детей, и они так искусно овладели ею, что понимали речь почти так же хорошо, как их сверстники с нормальным слухом<sup>45</sup>. Главное, что нам следует уяснить, — при таком подходе вся информация поступает к получателю через осязание.

В 1970-х годах слабослышащий изобретатель Дмитрий Каневский предложил двухканальное вибромактильное устройство, где один канал

предназначался для низкочастотного диапазона, а другой — для высокочастотного. Два вибромотора помещались на запястьях. К 1980-м годам в Швеции и США появилось множество подобных разработок, подтверждавших мощь и плодотворность научного подхода, опирающегося на силу живых связей. Но, как и прежде, громоздкость подобных устройств, а также ограничение числа вибромоторов (чаще всего предусматривался всего один) оставались камнем преткновения и препятствовали их широкому практическому применению<sup>46</sup>. Сегодня мы можем с наибольшей пользой применять достижения прогресса при обработке сигналов, сжатии аудиосигнала, накоплении и хранении энергии вкупе с появлением недорогих носимых на теле вычислительных устройств достаточной мощности, чтобы в реальном времени производить сложную обработку звуковых сигналов.

Более того, наметился прогресс и в самом подходе к подобным заместительным устройствам. Для сравнения вспомним кохлеарные имплантаты (наподобие того, каким пользовался Майкл Хорст, с которым мы познакомились в начале главы), установка которых стоила порядка \$100 000<sup>47</sup>. А современные технологии позволяют скорректировать нарушения слуха за несколько сотен долларов, что открывает возможности для решения этой проблемы в глобальном масштабе. К тому же имплантация подразумевает инвазивную хирургию, тогда как вибrotактильный браслет достаточно по утрам надевать на запястье, как наручные часы<sup>48</sup>.

\*\*\*

Преимущества осязательной системы разумно использовать по множеству причин. Например, возьмем малоизвестный факт, что людям после ампутации ноги приходится прилагать неимоверные усилия, чтобы научиться использовать протез при ходьбе. Но почему, учитывая высокое качество современных технологий протезирования, ходить на протезированной ноге так сложно? Ответ прост: мозг попросту не знает, где она располагается. Здоровая нога непрерывно транслирует мозгу огромный объем данных, информируя, в каком положении она находится, насколько согнута в колене, каково давление на голеностоп, каковы наклон и поворот стопы. Протез же нем как рыба, от него не поступает никаких сигналов, и потому мозг не представляет, как расположена и как двигается эта «неродная» конечность. Мы установили на протез датчики давления и угла наклона/поворота, транслирующие сигналы вибrotактильному жилету Neosensory Vest. Благодаря этому индивид может чувствовать положение протеза так же, как чувствует положение здоровой ноги, и легко научиться ходить с ним (рис. 4.16).

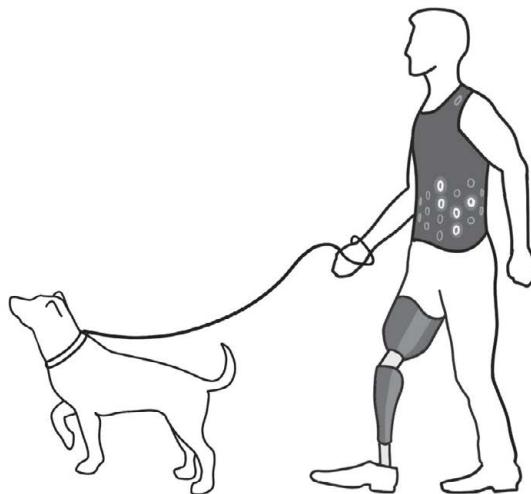


Рис. 4.16. Поток данных от протеза передается на кожу туловища

Данная методика применима и в случае, когда теряется чувствительность живой ноги — так происходит при болезни Паркинсона и ряде других заболеваний. В этом случае мы помещаем в носок датчики, измеряющие параметры движения и давления на конечность, а данные с них передаются браслету Buzz. Благодаря этому пользователь понимает, в каком положении его стопа, опирается ли он на нее в настоящий момент и насколько ровна опорная поверхность.

Тактильные ощущения можно использовать также для решения проблем с равновесием. Помните наязычный электродный дисплей в разработках Пола Бах-и-Риты? Этот дисплей способен на большее, чем просто замещать зрение. Рассмотрим случай консультанта по реабилитации Шэрил Шильтц, которая утратила чувство равновесия после того, как вестибулярный аппарат в ее внутреннем ухе повредился из-за лечения антибиотиками. Шэрил лишилась возможности вести нормальную жизнь, поскольку уже не могла постоянно поддерживать тело в равновесии и постоянно падала. Она узнала о новой разработке, которая могла бы помочь ей: ученые создали шлем, оборудованный датчиками для отслеживания наклона головы<sup>49</sup>. Полученные данные передавались наязычной плате: когда голова была ориентирована строго прямо, сигнал электростимуляции ощущался по центру платы, при наклоне вперед перемещался к кончику языка, при наклоне назад — соответственно к его задней части. Наклон головы в ту или иную боковую сторону передавался смещением электрического сигнала вправо или влево. Таким образом устройство позволяло

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

человеку, начисто лишившемуся чувства равновесия, получать представление о наклоне своей головы через ощущения на языке.

Шэрил записалась добровольцем на испытание устройства, но с изрядной долей недоверия. Однако эффект проявился немедленно: пока на голову был надет шлем, мозг понимал информацию, поступавшую неведомыми ему путями, а Шэрил в свою очередь сохраняла равновесие головы и тела. После нескольких сеансов Шэрил вместе с командой разработчиков обнаружили остаточный эффект: если она носила шлем в течение десяти минут, то могла нормально сохранять равновесие в течение еще десяти минут после того, как снимала его. Женщину настолько впечатлил этот эффект, что после первых экспериментов она бросилась благодарно обнимать разработчиков.

Кстати, новости оказались еще лучше, чем она предполагала. Поскольку в результате использования платы мозг Шэрил перестраивал свои нейронные подключения, после снятия шлема продолжительность благоприятного остаточного эффекта постепенно увеличивалась. Мозг догадывался, как принимать шепот неповрежденных сигналов и усиливать их, руководствуясь сигналами, поступающими от шлема. Через несколько месяцев Шэрил смогла значительно сократить время его ношения. Наязычная плата сработала как нейронная подстраховка и помогла Шэрил натренироваться в распознавании остаточных шепотков-сигналов от вестибулярной системы и тем самым развить необходимые навыки, чтобы отказаться от шлема.

\*\*\*

Сенсорное замещение открывает новые просторы для компенсации утраченных сенсорных ощущений<sup>50</sup>. Однако это лишь первый шаг, и нас ждут другие, более широкие возможности за пределами сенсорного замещения, а именно расширение сенсорного восприятия. А что, если мы сможем развить наши нынешние способности к чувствованию, обострить их, расширить и активизировать? И не только восполнить утраченные, но и качественно улучшать те, что даны нам от природы?

## Улучшаем периферию

Терапевтические приспособления разрабатывают для того, чтобы устранить тот или иной дефицит и вернуть положение к норме. Но зачем на этом останавливаться? Предположим, хирургия дала положительный результат или вспомогательное устройство успешно установлено, — и это прекрасно.

## Живой мозг

Но почему бы еще чуть-чуть не поколдовать, чтобы наделить человека сенсорными дарованиями, не предусмотренными природой для нашего вида? Это не просто теоретизирование: вокруг нас множество примеров сверхмощных чувствительных способностей человеческого мозга.

\*\*\*

В 2004 году музыкант и художник Нейл Харбиссон с врожденной монохромазией (отсутствием цветовосприятия) под впечатлением от перспектив в замещении зрительного восприятия звуковым вживил в костную ткань черепа eyeborg (глазборг) — устройство, которое анализирует цвета и преобразует их в звуковые волны. Звук подается на участок черепа за ухом за счет костной звукопроводимости (рис. 4.17).



Цвет	Частота звуковой волны, Гц
Ультрафиолетовый	Свыше 717,6
Фиолетовый	607,5
Синий	573,9
Голубой	551,2
Зеленый	478,4
Желтый	462,0
Оранжевый	440,2
Красный	363,8
Инфракрасный	Ниже 363,8

Рис. 4.17. Слева: Нейл Харбиссон восполняет врожденную монохромазию вживленным в череп электронным глазом. Справа: его «sonoхроматические шкалы»\* переводят распознаваемые камерой цвета в звуковые частоты. Расширение восприятия за счет включения самых высоких и самых низких частот позволяет его звуковой системе преодолевать естественные границы чувствительности зрительной системы

Теперь, не имея возможности зрительно воспринимать цвета, Нейл слышит их. Он ловит в поле зрения устройства любой окрашенный объект и описывает, какие в нем присутствуют цвета<sup>51</sup>. Например: «Вот тут зеленый. А здесь — пурпурный».

Более того, камера его глазборга улавливает световые волны за пределами воспринимаемого человеческим глазом спектра, и при переводе

\* Нейл Харбиссон разработал шкалы цветового звука — соответствия цветов музыкальным звуковым волнам. Прим. пер.

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

цветов в звуки Харбиссон способен кодировать (и воспринимать в окружающем пространстве) инфракрасное и ультрафиолетовое излучение, как это делают змеи и пчелы.

Когда Харбиссону понадобилось обновить фото на паспорте, он отказался снимать глазборг, утверждая, что это его неотъемлемая часть, такая же, как любая другая часть тела. В паспортной службе возражения Нейла оставили без внимания: согласно служебному протоколу на официальных фотографиях не допускается присутствия электронных устройств. После отказа в отделение паспортной службы посыпались письма в поддержку Нейла Харбиссона от его врача, друзей и коллег по цеху. И спустя месяц он был сфотографирован на паспорт вместе с глазборгом. По горячим следам своего успеха Нейл заявил, что стал первым официально признанным властями киборгом<sup>52</sup>.

Идею усиления сенсорного восприятия ученые продвинули еще на шаг вперед, экспериментируя с животными. Мыши, например, не способны различать цвета, но с помощью методов генной инженерии можно сконструировать им фоторецепторы, обеспечивающие цветное зрение<sup>53</sup>. Дополнительный ген дал мышам способность различать цвета. Точно так же можно усовершенствовать зрение обыкновенной беличьей обезьяны, которая в норме имеет два типа цветовых рецепторов и потому не различает зеленый и красный цвета. Но стоит снабдить их дополнительным цветовым фоторецептором, как зверьки получают в пользование цветовосприятие такого же уровня, как у людей<sup>54</sup>. А если точнее — типичного для человека уровня восприятия цветов.

Как выяснилось, у незначительной части женщин вместо трех типов цветовых фоторецепторов имеются четыре, и, следовательно, их мозг сумел пустить в дело эту дополнительную информацию и сформировать новый тип чувственного опыта, который позволяет воспринимать большее число уникальных цветов и новые смешанные цвета<sup>55</sup>. При подключении нового периферийного устройства полезная информация вносит свой вклад в работу мозга.

\*\*\*

Иногда расширение сенсорных возможностей происходит ненамеренно. Многим людям проводят операции по удалению катаракты и устраниению помутнения роговой оболочки глаза\* путем ее замены на синтетическую. Как выяснилось, естественная роговица блокирует

\* Автор пишет о двух разных вариантах снижения зрения. Помутнение хрусталика называют катарактой. Роговица мутнеет в результате целого ряда повреждений и болезней. Роговицу, как и хрусталик, могут заменять. Прим. ред.

ультрафиолетовый свет, а заменяющая ее искусственная пропускает. В итоге пациенты с пересаженной роговицей открывают у себя новую способность воспринимать глазом цвета электромагнитного спектра, которых раньше видеть не могли. Так, инженеру Алеку Комарницкому пересадили искусственную роговицу, и теперь он замечает вокруг некоторых объектов ореол синевато-фиолетового цвета, который никто, кроме него, не видит<sup>56</sup>. В первый раз он заметил такое на следующий день после операции, взглянув на шорты сына с символикой бейсбольной команды Colorado Rockies. Для всех шорты были черными, однако Алек увидел, что ткань испускает синевато-фиолетовое свечение. Когда пытливый инженер поместил на оперированный глаз ультрафиолетовый фильтр, цвет шорт сразу сделался черным, каким его видели все остальные. Если в помещении включить лампу «черного света» (излучающую только ультрафиолетовый свет), вы ничего не увидите, зато для Алека помещение зальется ярким пурпурным свечением. Новоявленная сверхспособность, позволяющая воспринимать цвет за пределами видимого человеку спектра, обогащает зрительный опыт Алека новыми впечатлениями, когда он любуется закатами, цветами в саду или смотрит на огонь горелок газовой плиты.

В штаб-квартире нашего проекта Neosensory инженер Майк Перротта как-то раз подключил к одному из вибротактильных браслетов инфракрасный сенсор. Вечером, надев для пробы этот браслет, я пошел между зданиями по неосвещенной улице и вдруг почувствовал вибрации на запястье. Сначала я ничего не понял. Откуда тут, на улице, взялось инфракрасное излучение? Наверное, это ошибка кодировки или с самим браслетом что-то не в порядке, подумал я. Но все же пошел в направлении сигнала, и чем дальше шел, тем больше он усиливался. В итоге сигнал привел меня прямехонько под инфракрасную камеру наблюдения, окруженную светом от инфракрасных светодиодов. Мы обычно не видим уличных камер ночного наблюдения, подглядывающих за нами, зато они немедленно обнаруживаются, если у вас на руке окошко в эту часть светового диапазона.

Аналогичным образом зрительный опыт расширяют и у животных. Так, в 2015 году ученые Эрик Томсон и Мигель Николелис подключили детектор инфракрасного света напрямую к мозгу крысы и убедились, что она научилась использовать новую возможность. Крыса выполняла тестовые задания, в которых от нее требовалось видеть инфракрасное излучение и руководствоваться им при выборе предлагаемых вариантов действий. Когда к соматосенсорной коре животного подключили один детектор, у нее ушло сорок дней, чтобы научиться выполнять задание. Еще в одном эксперименте Томсон и Николелис имплантировали другой

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

крысе три дополнительных электрода, и она обучилась выполнять задание всего за четыре дня. А потом имплантировали инфракрасный детектор уже непосредственно в зрительную кору, и этой крысе понадобился всего день, чтобы освоить задание.

Входящий инфракрасный сигнал на поверхку оказался просто еще одним типом данных, которыми может воспользоваться мозг крысы. Не играет роли, какими путями поступают в мозг данные; главное, чтобы поступали. Что важно: добавление инфракрасного детектора никоим образом не нарушило нормального функционирования соматосенсорной коры; как и до имплантации, крыса свободно пользовалась усиками и лапками, чтобы ориентироваться в пространстве. Наоборот, новое чувство легко добавилось к уже имевшимся. Руководитель исследований, только что получивший учченую степень научный сотрудник Эрик Томсон не скрывает, насколько его воодушевляют результаты и значение проведенных экспериментов:

«Изумительно, не устаю поражаться! Мозг, что и говорить, всегда жаден до новых источников информации, но сам факт, что он реально освоил источник нового, чуждого ему типа, да еще с такой быстротой, открывает благоприятные перспективы в области нейропротезирования».

\*\*\*

В силу причуд нашего долгого, извилистого эволюционного пути мы приобрели глаза числом две штуки, расположенные в передней части головы и дающие нам угол обзора примерно в 180°. Угол обзора фасеточных глаз муhi, в отличие от наших, составляет практически 360°. А что, если мощь современных технологий поможет и нам наслаждаться панорамным зрением?

Именно такой фокус удалось группе ученых во Франции: они спроектировали шлем FlyVIZ с круговым обзором на все 360°. На шлеме установлена видеокамера, которая сканирует окружающее пространство по кругу и в сжатом виде передает на дисплей перед глазами пользователя<sup>57</sup>. Как отмечают конструкторы FlyVIZ, когда человек первый раз надевает шлем, ему приходится перетерпеть период адаптации к нему (головокружение, тошнота). Однако это состояние длится на удивление недолго: через какие-то 15 минут он привыкает к шлему и уже может взять предмет, с какой бы стороны ему его ни протягивали, увернуться от того, кто старается незаметно подкрасться к нему сзади, и даже поймать брошенный сзади мяч (рис. 4.18).



Рис. 4.18. Вот каково иметь угол обзора 360°

А что, если вы сможете не только видеть на 360°, но и распознавать предметы и объекты, в обычном случае невидимые, например в темноте ощущать присутствие людей вокруг вас?

Представим, что команду наемников забросили на некую территорию для отлова враждебных роботов-антропоморфов. Что, выглядит как сцена из сериала телеканала HBO «Мир Дикого Запада»? Ну, в общем-то так оно и есть: привлеченный в качестве научного консультанта, я предложил для данного сюжета нашу технологию. В конце первого сезона восстают хости (androïds), поставленные выполнять безграничные прихоти гостей парка, и в начале второго сезона на расправу с мятежниками посылают группу элитного спецназа. Отважные спецназовцы одеты в наши «специально обученные» жилеты, которые позволяют им чувствовать местоположение хостов-андроидов — затаились ли те во тьме, крадутся ли за изгородями, прячутся ли в самых неожиданных местах, находятся ли слева на расстоянии 180 метров, прямо за спиной или по ту сторону стены. Хотя действие сериала отнесено на 30 лет вперед, современные технологии позволяют проделывать подобные штуки уже сейчас и тем самым расширять пределы возможностей наших прекрасных, но, увы, не всевидящих глаз, дарованных нам природой.

\*\*\*

Сюжетную интригу «Мира Дикого Запада» я вспоминал через несколько месяцев после нашей совместной работы с Google, когда мы проводили очень крутой эксперимент с незрячими людьми. Некоторые из офисов компании оборудованы лидарами (световыми радарами), это вращающееся устройство вы наверняка видели на некоторых автомобилях. В офисном пространстве лидар позволяет отслеживать местонахождение любого движущегося объекта — в данном случае сотрудников, перемещающихся по офису.

Мы подключились к потоку информации с лидаров и направили его на жилет Vest. Потом привели в офис незрячего парня по имени Алекс. Надели на него жилет — и пожалуйста: подобно спецназовцам из «Мира Дикого Запада», он сразу же стал чувствовать местоположение передвигавшихся по офису сотрудников, причем при полном круговом обзоре, как будто из незрячего превратился в джедая. Алекс мгновенно обрел эту способность, и это, заметьте, при нулевой кривой обучения.

Помимо того что мы продемонстрировали, насколько легко расширить наши чувства, отметим, что приобретенный Алексом опыт хорошо подкрепляет модель «Мистер Картофельная Голова». Подключите к мозгу новый поток данных, и он тут же сообразит, как использовать эту информацию в своих интересах. Алексов жилет, камера на шлеме FlyVIZ, а также крыса с вживленным инфракрасным детектором иллюстрируют, насколько неуместно само понятие традиционности, когда дело касается биологии. Мы можем улучшать себя и расширять свои способности, выходя за пределы, установленные генетикой.

Расширение чувств не ограничивается зрением. Возьмем, например, слух. Уже сегодня вспомогательные устройства — начиная со слуховых аппаратов и заканчивая вибrotактильными браслетами Buzz — способны вывести нас за границы нормального слухового восприятия. А почему бы нам не раздвинуть его до ультразвукового диапазона, чтобы улавливать звуки, доступные пока только слуху котов и летучих мышей? Или обрести восприятие инфразвука, с помощью которого общаются слоны?<sup>58</sup> При таком прогрессе технологий слухового восприятия у нас нет разумных причин ограничивать входящие аудиоданные о мире рамками чувств, по воле эволюции закрепленных за нашим видом.

То же можно сказать об обонянии. Помните, я упоминал бладхаунда с его способностью чуять запахи, и близко не доступные человеческому обонянию? А теперь представим, что сконструирован комплект молекулярных детекторов, позволяющий обнаруживать и распознавать различные субстанции. Тогда не понадобятся натасканные на наркотики полицейские собаки с особо тонким нюхом: благодаря расширению обонятельной способности вы сможете сами улавливать и анализировать запахи с неменьшей тонкостью и точностью.

\*\*\*

Подобные проекты распахивают перед нами новые окна в мир, делая видимым то, что сегодня выпадает из нашего поля зрения. А что, если помимо вывода сенсорных возможностей за пределы нормы мы смогли бы создать абсолютно новые типы чувствования? Или

научились бы напрямую воспринимать магнитные поля либо потоки данных в Twitter? Потрясающая гибкость мозга предлагает нам возможность переводить потоки этих данных непосредственно в восприятие. Рассмотренные нами принципы позволяют задуматься о чем-то большем, чем сенсорное замещение или расширение сенсорного восприятия, и оценить возможности дополнения нашей сенсорики новыми чувствами<sup>59</sup>.

## Наколдаем себе новый сенсориум

Знакомьтесь: Тодд Хаффман, биохакер. Его волосы вечно окрашены в тот или иной цвет — красный, зеленый или синий; в остальном же с виду он деревенщина деревенщиной. Несколько лет назад Тодд заказал по почте миниатюрный неодимовый магнит\*. Получил его, обработал антисептиком, а затем простерилизовал скальпель и свою руку и имплантировал магнитик в мизинец.

С тех пор Тодд чувствителен к магнитным полям. Магнит в его пальце улавливает, например, электромагнитное излучение бытовых приборов, а нервные волокна регистрируют эту реакцию. В результате информация, невидимая глазу обычного человека, поступает в мозг Тодда через чувствительные волокна его пальцев.

В первый раз он осознал, насколько расширился образ воспринимаемого мира, когда схватился за сковороду на электрической плите. Оказалось, что сковорода создает магнитное поле (поскольку плита не была заземлена, а значит, электричество не уходило в землю). Тодд был не в курсе этой пикантной подробности относительно своей плиты, но теперь сполна ощутил столь чувствительную обратную связь.

Вытянув руку, Тодд мог обнаружить электромагнитный пузырь, исходящий из силового кабеля трансформатора (подобным устройством оборудован и ваш лэптоп). Тодд как будто трогал этот невидимый пузырь и круговыми движениями руки даже мог определить его форму. Сила магнитного поля для Тодда определяется тем, насколько активен магнитик в пальце: на разные частоты магнитных полей он реагирует по-разному, и Тодд, соответственно, приписывает разным трансформаторам разные качества в таких понятиях, как фактура или цвет.

---

\* Неодимовый магнит — мощный постоянный магнит, состоящий из сплава редкоземельного элемента неодима, бора и железа. Это самый мощный сегодня магнитный материал нового поколения, нашедший широкое применение во многих отраслях науки и техники, а также в быту. *Прим. ред.*

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

Биохакер Шенон Ларрatt в одном из интервью рассказывал, что чувствует, как течет по проводам электрический ток, и потому может диагностировать аппаратные неполадки без вольтметра, а только с помощью пальцев. По его словам, если удалить ему имплантаты, он почувствует себя слепым<sup>60</sup>. Словом, мы приобретаем возможность обнаруживать грани мира, прежде недоступные нашим чувствам: оказывается, ореолом из осязаемых форм окружены микроволновые печи, вентиляторы в корпусе компьютеров, акустические колонки, подземные силовые трансформаторы.

А что, если бы мы могли чувствовать не только магнитные поля вокруг различных объектов, но и магнитное поле Земли? Животные обладают такой способностью. Черепахи, например, всегда возвращаются на побережье, где вылупились, чтобы самим отложить там яйца. Перелетные птицы каждый год мигрируют из Гренландии в Антарктику, а потом неизменно возвращаются в те же места, откуда улетали. И почтовые голуби, доставляя послания, ориентируются в пространстве и находят дорогу к адресатам лучше и точнее, чем курьер-человек.

Российский ученый-зоолог XIX века Александр фон Миддендорф заинтересовался «магией» этих животных и в 1885 году предположил, что они руководствуются внутренним компасом: «Подобно магнитной стрелке корабельного компаса, эти воздухоплаватели обладают внутренним магнитным чутьем, которое может быть связано с гальваническим магнитным полем мира»<sup>61</sup>. Проще говоря, птицы используют магнитное поле планеты, чтобы прокладывать свои маршруты.

Ученых из Оsnабрюкского университета с 2005 года интересовал вопрос, смог бы человек при помощи носимого на теле устройства тоже улавливать магнитные сигналы Земли? Плодом их размышлений и инженерных усилий стал навигационный пояс *feelSpace*. По всему периметру он оборудован вибромоторами, причем выбирает тот, что ориентирован на север. И как бы ни было повернуто ваше тело, вы всегда будете ощущать вибрации в направлении Северного магнитного полюса\*.

На первых порах вы ощутите лишь назойливое жужжание, но со временем привыкнете получать пространственную информацию и всегда быть в курсе, что север — вон в том направлении<sup>62</sup>. По прошествии нескольких недель пояс качественно меняет манеру навигации пользователя: человек лучше ориентируется на местности, у него выстраиваются

\* Северный магнитный полюс — условная точка Северного полушария Земли, в которой ее магнитное поле направлено строго вниз (под углом 90° к поверхности). Не совпадает с географическим Северным полюсом. *Прим. ред.*

новые стратегии передвижений, улучшаются представления о взаимном расположении различных мест и объектов в пространстве. Внешняя среда представляется ему более пространственно упорядоченной, ему проще запоминать взаимное расположение объектов.

Как описывает опыт ношения пояса *feelSpace* один из участников эксперимента, «интересные вещи происходили с ориентацией в городах. Вернувшись домой, я мог легко воспроизвести взаимное расположение всех мест, где побывал, зданий, помещений в зданиях, даже если специально не фиксировал внимание на их расположении»<sup>63</sup>. Свои передвижения пользователи пояса воспринимают не как переход от одного ориентира к другому, а как перемещение по целостному пространству с глобальной точки зрения. Другой пользователь отмечает: «Это были не просто тактильные стимуляции, потому что пояс передает тебе пространственное чувство. Я интуитивно осознавал, в каком направлении находится мой дом, а в каком — офис». Иными словами, этот человек переживал не сенсорное замещение (когда зрительную или слуховую информацию мозгу поставляют не свойственные каналы) и не сенсорное расширение (как обострение слуха или зрения) — перед нами пример сенсорного дополнения. Это новый для человека вид сенсорного восприятия и новый тип чувственного опыта\*. Но вернемся к рассказу пользователя:

«В первые две недели мне приходилось специально сосредоточиваться на этом чувстве, а потом оно стало интуитивным. Я даже мог мысленно нарисовать схему расположения мест и помещений, где иногда бываю. И вот что интересно: когда на ночь я снимаю пояс, ощущение его вибраций сохраняется. А когда поворачиваюсь на другой бок, вибрация тоже перемещается. Знаете, это фантастическое чувство!»<sup>64</sup>

Примечательно, что, когда пользователи снимают пояс, способность лучше и точнее ориентироваться в пространстве сохраняется, по их словам, еще некоторое время. То есть накопительный эффект от устройства длится дольше, чем его ношение. Точно так же, как в примере со шлемом для сохранения равновесия, внутренние, чуть слышные шепотки сигналов способны усиливаться, когда их подкрепляет внешнее устройство<sup>65</sup>.

\* Похоже, новым такой опыт является только для так называемого цивилизованного человека. Для кочевых коренных народов он естественен. Попробуйте-ка без него сориентироваться в бескрайней тундре облачным полярным днем. Прим. ред.

Испытанный участниками экспериментов чувственный опыт глубже и подробнее исследовался на крысах. В 2015 году ученые плотно закрывали зверькам глаза, а к зрительной коре подключали цифровой геомагнитный компас. Лишенные возможности пользоваться глазами крысы быстро соображали, как преодолеть лабиринт и добраться до лотка с кормом, руководствуясь исключительно направляющими сигналами «компаса» в голове<sup>66</sup>.

Мозг, какие бы данные он ни получал, всегда найдет им применение.

\*\*\*

В 1938 году авиатор и мастер на все руки Дуглас Корриган с грешком пополам вернул к жизни одноместный самолет Spirit of St. Louis (на таком Чарльз Линдберг\* в 1927 году совершил свой знаменитый трансатлантический перелет). Правда, результат оставлял желать лучшего, и кто-то из аэродромных механиков в насмешку окрестил уродца Spirit of \$69.90. На нем-то Корриган и совершил перелет из США в Ирландию. В те ранние времена авиастроения навигационные приборы не баловали разнообразием: обычно это был компас в сочетании со свисающим отрезком стропы для определения направления воздушного потока. В репортаже о перелете Корригана иллинойская ежедневная газета The Edwardsville Intelligencer привела слова одного авиамеханика, назвавшего Корригана авиатором, который *flies by the seat of his pants* («пилотирует, чувствуя задницей», то есть больше по наитию, чем по показаниям приборов). Есть общее мнение, что именно оттуда и берет начало этот авиационный жаргонизм, означающий «пилотировать, чувствуя самолет». Как-никак именно седалище пилота имело наибольшую площадь соприкосновения с корпусом самолета и потому неизменно служило проводящим путем для информации, поступающей в мозг. Пилот чувствовал изменения в положении самолета и соответственно реагировал на них. Если при выполнении поворота самолет испытывал крен на крыло с внутренней стороны, седалище съезжало по сиденью вниз. Если при повороте развивался крен на внешнюю сторону, даже слабая перегрузка толкала пилота вверх. Индикатор поворота и скольжения изобрели только после Первой мировой войны, а до тех пор пилоты в летной практике не без успеха определяли многие параметры полета (угол крена, скорость ветра, температуру за

\* Чарльз Линдберг — американский летчик, первым перелетевший Атлантический океан в одиночку по маршруту Нью-Йорк — Париж 20–21 мая 1927 года. Прим. ред.

бортом, общее поведение самолета), чутко прислушиваясь к собственным тактильным ощущениям, особенно при полетах в условиях плотной облачности или тумана.

В этом смысле чувственное восприятие данных имеет долгую историю, и мы, сотрудники компании Neosensory, стараемся выйти на новый уровень. В частности, работаем над расширением палитры восприятия у пилотов дронов. Виброжилет Neosensory передает поток данных по пяти параметрам полета квадрокоптера — тангаж, рыскание, крен, ориентация и курс, что улучшает способность пилота управлять самолетом. По сути, пилот как бы продлевает собственную кожу во внешнее пространство, куда-то на высоту, где летит его дрон.

Если вы тешились романтическими представлениями об авиаторах прошлых времен, спешу разочаровать вас: пилотам все же предпочтительнее управлять самолетом, полагаясь не на интуицию, а на показания бортового оборудования. Благодаря множеству инструментов в кабине полеты стали безопаснее. Например, пилот не может со своего места определить, летит ли самолет в строго горизонтальном положении или в повороте с креном<sup>67</sup>. Богатый пилотажный инструментарий намного лучше, чем его отсутствие. Но все упирается в проблему, как передать мозгу богатство входящей информации. Загляните в кабину пилотов: она под завязку забита всевозможными устройствами. Между тем зрительная система не в состоянии с одного взгляда охватить всю картину показаний приборов и должна оценивать их по одному зараз, что довольно медленно. С этой точки зрения было бы любопытно переосмыслить схему организации современной кабины пилотов: вместо того чтобы визуально считывать все показания приборов, пилот мог бы ощущать их. Поток данных большой размерности, транслируемый непосредственно телу, одним махом скажет пилоту все о самолете и его поведении в воздухе. Почему у этой идеи хорошие шансы на успех? Потому что мозг прекрасно умеет считывать поступающие от тела многомерные данные. Поэтому же, например, у вас получается балансировать на одной ноге: разные группы мышц ног, туловища и рук одновременно направляют информацию в мозг, а тот ее обобщает и тут же отсылает назад корректирующие команды.

В этом свете разница между пилотированием по наитию и по ощущениям кожи туловища имеет прямое отношение к объему входных данных. А поскольку мы живем в перенасыщенном информацией мире, похоже, нас все же ожидает переход от оценивания больших массивов данных (Big Data) к их непосредственному восприятию.

Представьте, что вы можете оценить текущее состояние предприятия с десятками одновременно работающих станков, поскольку подключены к потокам данных, позволяющих ощущать, как работает оборудование и какова производительность одних станков в сравнении с другими. Если в их слаженной работе возникнет сбой и потребуется где-то что-то поправить или отладить, вы почувствуете это. Я не имею в виду поломки — такого рода проблемы решаются просто, достаточно оборудовать машины аварийными или предупреждающими сигналами. А как вы поймете, насколько согласовано действие одних машин по отношению к другим? Такой подход к Big Data позволяет вскрыть глубинные закономерности и взаимосвязи.

Для расширения сенсорного восприятия можно найти разнообразные способы. Представим, что данные о самочувствии пациента напрямую поступают на кожу спины хирурга и ему во время операции не надо все время смотреть на мониторы. Или допустим возможность ощущать невидимые глазу состояния собственного тела, например кровяное давление, частоту пульса и характер кишечной микрофлоры, что поднимет бессознательные сигналы на уровень регистрируемых сознанием. Или представим, что космонавт ощущает текущее состояние Международной космической станции. Ему не надо совершать постоянные облеты всех отсеков и снимать показания с многочисленных приборов и мониторов, потому что — только представьте! — данные о функционировании различных модулей станции он воспринимает как тактильные паттерны различных форм.

Сделаем еще шаг вперед. В рамках проекта Neosensory мы исследуем концепцию разделяемого восприятия. Представим, что супруги или просто пара влюбленных ощущают показатели состояния партнера, например частоту дыхания, температуру, кожно-гальваническую реакцию. Мы можем замерять эти показатели у одного партнера и через интернет транслировать их на вибrotактильный браслет Buzz другого. Это открывает новую возможность для более глубокого взаимопонимания. Представьте, что супруга позвонила вам с другого конца страны: «У тебя все в порядке? Похоже, ты испытываешь стресс». Для отношений подобное взаимодействие может обернуться либо большим благом, либо сущим проклятьем, однако создает условия для объединенного опыта.

Эти замыслы могут оказаться действенными, потому что наши входные потоки данных чахнут на задворках сознания; мы осознаём свои ощущения, только когда нарушаются наши ожидания. Представьте ощущения от туфли на вашей правой ноге. Вы можете специально прислушаться к потоку данных от нее и почувствовать, что туфля — да, вот

она, — надета на вашу ногу. Но в общем случае данные от кожи ноги находят приют где-то ниже кромки сознания. К потоку подобной информации вы прислушаетесь, только если в туфлю попадет камешек. Точно так же обстоит дело с потоком данных от космической станции или от супруга: вы не будете в курсе их состояния и ощущений, пока специально не сосредоточите на них внимание или пока они не подкинут сюрпризец, настоятельно требующий вашего участия.

\*\*\*

Теперь представим, что паттерны вибраций используются, чтобы транслировать потоки информации из интернета напрямую в мозг. Вообразите, что вы ходите в нашем виброжилете и кожей ощущаете потоки данных от атмосферных элементов в радиусе 200 километров. В какой-то момент у вас обязательно разовьется опыт прямого восприятия погодных паттернов вашего региона в масштабах куда больших, чем в норме способен воспринимать человек. Вы сможете предупреждать друзей, что надвигается дождь, и не исключено, что с большей точностью, чем синоптики. Этот новый тип чувственного опыта вы никогда не получите от нормального, ограниченного размерами человеческого тела.

А представьте, что виброжилет передает вам текущие сведения о фондовой торговле, и мозг извлекает смыслы из сложных многогранных движений мировых рынков. Он способен проделывать гигантскую работу по выявлению статистических закономерностей, даже если вам кажется, что ваше внимание на этой работе не сосредоточено. А если целый день ходить в виброжилете и иметь общее представление о происходящем вокруг вас (быть в курсе последних новостей, рождающейся уличной моды, состояния экономики), у вас может развиться мощная интуиция — более точная, чем прогностические модели, — направленная на анализ событий рынка. Это тоже стало бы принципиально новым опытом.

Вы спросите, почему бы не привлечь к этому делу глаза и уши? Нельзя ли подключиться к сток-трейдеру\* с помощью очков виртуальной реальности и собственными глазами наблюдать за графиками курсов десятков ценных бумаг в реальном режиме? Проблема в том, что глаза необходимы нам для слишком большого круга повседневных задач. А сток-трейдеру, помимо отслеживания курсов ценных бумаг, глаза нужны, чтобы

---

\* Сток-трейдер (биржевой трейдер) — человек или компания, занимающиеся покупкой и продажей ценных бумаг. *Прим. ред.*

отыскать кафе поблизости, засечь приближение босса или прочитать свою электронную почту. Зато его кожа, в отличие от глаз, — отличный широкополосный и неиспользуемый информационный канал.

Способность ощущать кожей Big Data, вероятно, помогла бы трейдеру воспринимать картину целиком (нефть вот-вот рухнет) задолго до того, как он сможет собрать данные по отдельным участникам рынка (Apple идет вверх, Exxon падает, Walmart прочно держит позиции). Как такое возможно? А вы вспомните о визуальных сигналах, которые получаете, глядя, как ваша собачка резвится на лужайке. Разве вы говорите себе: «Ага, вижу вот тут фотон и вон там еще один, побледнее, а тут полоска из очень ярких фотонов»? Ничего подобного — вы сразу воспринимаете целостную картинку.

Количество потоков данных, которые можно направлять из интернета в мозг, невообразимо. Все знают о замечательном чутье Человека-паука: ощущение покалывания предупреждает Питера Паркера, что где-то поблизости таится угроза. Так почему бы и нам не обзавестись твиттер-чутьем? Заметим для начала, что сегодня Twitter приобрел роль самосознания нашей планеты. Он стал «нервной системой», которая оплетает всю Землю, а важные идеи и мысли (а также кое-какие пустяшные) извлекает из собственных шумов и выталкивает на уровень общепланетарного сознания. Дело тут не в стараниях корпораций донести до вас свои месседжи, а в том, что землетрясение в Бангладеш, смерть кого-то из знаменитостей или новое открытие в глубинах космоса захватывают воображение достаточно большой массы людей по всему земному шару. Интересы мира вырываются вверх точно так же, как нервная система животного выносит на поверхность его сознания все важное (я голоден; кто-то приближается; надо найти водопой). Идеи, которые Twitter выносит на поверхность, могут быть и глобальными, и ничтожными, но в любом случае представляют собой то, что ежемоментно занимает умы человечества.

На конференции TED в 2015 году мы со Скоттом Новичем алгоритмически отследили все твиты с хештегом TED. Прямо по ходу выступления мы агрегировали сотни твитов и прогоняли через программу анализа эмоциональной окраски. Это позволило нам воспользоваться обширным тезаурусом слов-критериев, по которым твиты можно рассортировать на доброжелательные (потрясающие, вдохновляющие) или недоброжелательные (занудство, глупости). Итоговая статистика в реальном времени направлялась на мой виброжилет, и я ощущал эмоции аудитории и малейшие перемены в них. В итоге я приобрел чувственный опыт чего-то большего, чем обычно доступно человеку: был подсоединен к общему

## Живой мозг

эмоциональному настрою сотен людей, всех вместе и сразу. Воображение легко нарисует вам политика, имеющего при себе такое устройство, когда он обращает пламенные речи к десятитысячной толпе потенциальных избирателей, на лету схватывая, какие из его заявлений принимаются на ура, а какие, наоборот, вызывают неприятие.

Если вы желаете мыслить масштабно, давайте отложим хештеги и обратимся к обработке естественного языка всех трендовых твитов планеты: представьте, как алгоритмы сжимают по миллиону твитов в секунду и непрерывно транслируют выжимки на вашу кожу через вибрации Neosensory-жилета. Это будет означать, что вы подключились к планетарному сознанию. Занимаясь своими делами, вы вдруг ощутите, что в Вашингтоне разразился политический скандал, в Бразилии бушуют лесные пожары, а на Ближнем Востоке вспыхнула очередная заваруха. Таким образом вы больше, чем когда-либо, становитесь человеком мира — в чувственном смысле.

Заметьте, я не утверждаю, что найдется так уж много желающих пристегнуть себя к планетарному сознанию, однако доказанность самого принципа (рассуждая о сенсорном дополнении, мы вольны мыслить за пределами привычной нормы) определенно откроет нам много нового.

Меня иногда спрашивают, почему мне вообще пришло в голову подключать к этим потокам данных именно человека, когда можно было бы использовать компьютер. Разве мощные искусственные нейронные сети не способны более качественно распознавать паттерны и закономерности?

Необязательно. Компьютеры умеют продемонстрировать высший класс в распознавании закономерностей, однако не обладают одним особенно значимым навыком: им неведомо, что именно важно для человека. В сущности, людям и самим не всегда дано наперед знать это. Вот почему человек в роли распознавателя паттернов всегда будет шире смотреть на вещи и мыслить более гибко, чем искусственные нейронные сети. Возьмем для примера фондово-рыночный виброжилет. Гуляя по улицам Нью-Йорка, Шанхая или, скажем, Москвы, вы невольно подмечаете мелкие подробности: во что одеты люди, какие товары их привлекают, насколько оптимистично или, наоборот, негативно они настроены. Возможно, вы и сами заранее понятия не имеете, на что обращать внимание, но все, что вы видите и слышите вокруг себя, добавляет данных вашим внутренним представлениям об экономике. А когда виброжилет вдобавок сообщает о колебаниях цен на те или иные бумаги, комбинация входящей информации от ваших органов чувств и от виброжилета

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

обогащает сложившуюся в вашем представлении картину. Искусственные же нейронные сети, сосредоточенные исключительно на выявлении закономерностей в совокупности загружаемых в них числовых данных, изначально ограничены выбором, заданным программистами.

\*\*\*

Многие годы Рене Декарт<sup>\*</sup> волновал вопрос, как познать *настоящую* окружающую его реальность. Наши чувства, рассуждал он, частенько обманывают нас, и нам свойственно путать увиденное в сновидениях с пережитым наяву. Как узнать, вдруг злокозненный дьявол последовательно и целенаправленно обманывает меня, играет со мной, рисуя ложную реальность вместо той, какова она на самом деле? В 1980-х годах американский логик и философ Хилари Патнэм придал вопросу Декарта новое звучание: «Суть ли я мозг в сосуде?»<sup>68</sup> Откуда вам знать, может быть, учёные изъяли из вашего тела мозг и попросту ловко стимулируют его кору, заставляя вас верить, что вы ощущаете прикосновение к книге, температуру своей кожи, видите свои руки? В 1990-е годы вопрос снова трансформировался: «Не в Матрице ли я нахожусь?» В новом тысячелетии вопрос ставится в русле гипотезы симуляции: «Не являюсь ли я компьютерной симуляцией?»

Эти вопросы традиционно оставались уделом философии, но в наши дни из философских аудиторий мало-помалу просачиваются в стены нейробиологических лабораторий. Здесь уместно вспомнить, что наш привычный чувственный опыт есть нечто большее, чем входные потоки сенсорной информации. Точно такой же результат дали бы сигналы, подаваемые непосредственно в мозг. В самом деле, все множество сигналов, которые воспринимаются нашими органами чувств, в конечном счете конвертируется в одну и ту же электрохимическую форму, что предполагает возможность в обход органов чувств напрямую индуцировать в мозге электрохимические сигналы. Проще говоря, устранив посредников. Зачем вталкивать визуальную информацию через уши или язык, если есть возможность подключиться непосредственно к центральному процессору?

Такой технологией мы сегодня располагаем. Уже существует практика имплантации электродов — обычно в небольшом количестве, от одного до считанных десятков, — в субкортикальные области мозга для лечения таких состояний, как трепмор, депрессия и зависимости. Для передачи в кору

---

\* Рене Декарт (1596–1650) — французский философ, математик, механик, физик и физиолог. Прим. ред.

## Живой мозг

мозга значимого сенсорного ощущения может потребоваться намного больше электродов (не исключено, что даже сотни тысяч), чтобы стимулировать все богатство паттернов мозговой активности (рис. 4.19).

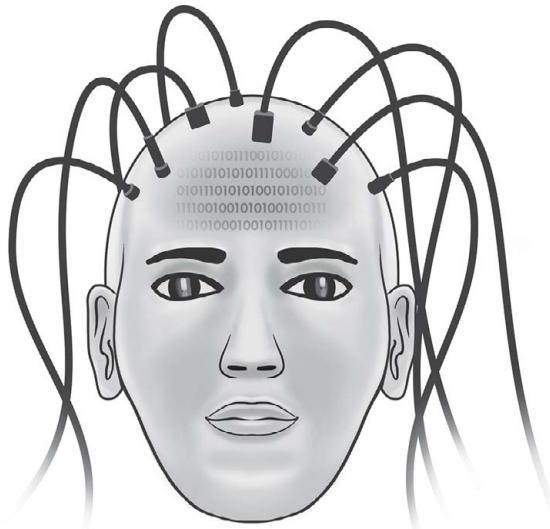


Рис. 4.19. Введение новых потоков данных непосредственно в кору мозга позволило бы создать дополненную реальность нового типа. Торчащие из головы провода изображены для наглядности — технологии будущего связаны исключительно с беспроводной связью: кто же захочет таскать за собой «хвост» из спутанных кабелей, рискуя, что какой-нибудь развяза непременно о него споткнется, как о шлейф невезучей невесты?

Несколько исследовательских групп уже работают в этом направлении. В Стэнфорде нейробиологи разрабатывают метод внедрения в кору мозга обезьяны 100 тысяч электродов, и это (при условии минимального повреждения мозговой ткани) откроет нам новые замечательные подробности работы нейронных сетей. Ряд перспективных компаний, пока еще находящихся в стадии становления, рассчитывают повысить скорость коммуникаций с внешним миром путем быстрой записи и прочтения нейронных данных с помощью напрямую подключенных модулей.

Сложность возникает не в теоретическом плане, а в практическом. Когда вы помещаете электроды в мозговую ткань, она потихоньку старается вытолкнуть из себя инородные тела, как кожа на пальце — занозу. Но это не самая большая проблема. Есть трудности и посерьезнее: нейрохирурги не желают проводить подобные операции, поскольку всегда сохраняется риск инфицирования или смерти пациента на столе. И если исключить

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

жизненно необходимое хирургическое вмешательство по медицинским показаниям (например, при болезни Паркинсона или тяжелой депрессии), неясно, захотят ли потребители подвергать себя рискам операций на открытом мозге ради удовольствия еще быстрее кропать текстовые сообщения друзьям. В качестве альтернативного решения можно было бы аккуратно запустить электроды в сосуды кровеносной системы мозга, однако здесь есть опасность повредить или — того хуже — перекрыть их.

И все же на горизонте для мозга вырисовываются перспективы получать и выдавать информацию на клеточном уровне, для чего имплантация электродов не понадобится. Еще одно-другое десятилетие, и масовая миниатюризация электроники коренным образом изменит технологии подачи сигналов непосредственно в мозг. Будущие возможности связаны с так называемой *нейронной пылью*. Это рассыпанные по поверхности мозга электронные имплантаты микроскопических размеров, которые записывают данные, посылают сигналы внешним приемным устройствам и передают слабые импульсы в мозг<sup>69</sup>.

Не будем забывать и о наноразмерной робототехнике. Представьте 3D-принтер с точностью на атомарном уровне. С помощью такого принтера можно спроектировать и построить молекулы сложного состава, по существу представляющие собой микроботов. Теоретически можно напечатать сотню миллиардов таких роботов, слепить из них крошечную пилюльку и проглотить. В соответствии с замыслом проектировщика эти нанороботы преодолеют гематоэнцефалический барьер, внедряются в нейроны и при их возбуждении начнут испускать сигналы, а также принимать, чтобы заставить нейроны активироваться. Это позволит обращаться — считывать и направлять данные — непосредственно к миллиардам отдельных нейронов мозга. Можно также использовать преимущества генетического подхода: строить бионанороботов из белков посредством кодирования их в ДНК. Существует множество методов доставки информации напрямую в мозг, и через несколько десятилетий мы, надо надеяться, достигнем той стадии, когда можно будет индивидуально прочитывать и контролировать каждый нейрон. На этой стадии мозг напрямую станет служить нам устройством расширения сенсорного восприятия, а надобность в вибротактильных жилетах, поясах и браслетах отпадет.

\*\*\*

Мы обсуждали способы доставки информации в мозг — вибрации на коже, легкие электрические разряды на языке, прямую активацию нейронов, — однако еще не ответили на важный вопрос: как будут ощущаться входные данные нового типа?

## Вообразим новый цвет

Мозгу в его костяной темнице, напомню, доступны лишь электрические сигналы, бодро передающиеся туда-сюда специализированными клетками. Он лишен прямого доступа к тому, что слышат уши, видят глаза или осязают пальцы. Какой бы модальности ни были входящие сигналы (рожденные симфонией колебаний звуковых волн, фотонными узорами от сверкания снежинок на покрытой снегом статуе, молекулами аромата свежеиспеченного яблочного пирога или болью от осиного укуса), в мозг они притекают только в виде всплесков электрических импульсов в нейронах.

Доведись нам наблюдать участок мозговой ткани со снающими из стороны в сторону электрическими импульсами и спроси я вас, не зрительная ли это кора перед нами, а может, звуковая или соматосенсорная, вы бы не смогли ответить. И я не смог бы. Всё выглядит одинаково.

Здесь мы подходим к вопросу, на который нейробиология еще не нашла ответа. Почему зрение по ощущениям так сильно отличается от обоняния? Или от вкуса? Почему вам никогда не спутать красоту подрагивающих на ветру сосновых лап со вкусом сыра фета? Или ощущение наядочной бумаги под пальцами с ароматом свежесваренного эспрессо?<sup>70</sup>

Вы могли бы предположить, что невозможность спутать ощущения от разных органов чувств каким-то образом связана с генетически определенным строением мозга и что слуховые области отличаются от тех, что отвечают за осязание. Но более тщательное изучение проблемы опровергает данную гипотезу. Как мы убедились в этой главе, если индивид лишен зрения, ту часть мозга, которую мы привыкли называть зрительной корой, захватывают другие чувства — осязание и слух. При исследовании мозга с такой переподключенной связью трудно утверждать, что в этой «зрительной» коре имеется нечто исходно и глубинно зрительное.

Сказанное подводит нас к альтернативной гипотезе: субъективный опыт переживания ощущения (чувственного явления) — называемый также квалиа\* — определяется структурой данных<sup>71</sup>. Иными словами, у информации, поступающей от двухмерной сетчатки глаза, структура иная, чем у данных, которые приходят от одномерного сигнала в ба-

\* Квалиа — термин, используемый в философии, преимущественно в англоязычной аналитической философии сознания, для обозначения сенсорных, чувственных явлений любого рода. Введен американским философом К. И. Льюисом в 1929 году. Прим. ред.

банной перепонке, и уж тем более и то и другое отличается от многомерных данных, посылаемых подушечками пальцев. Потому эти потоки данных и ощущаются по-разному. Близкородственная гипотеза утверждает, что квалиа формируется при изменении вашими двигательными реакциями входных потоков сенсорной информации<sup>72</sup>. Визуальные данные меняются всякий раз, когда вы посыпаете команды глазодвигательным мышцам. Изменение входных визуальных данных усвояемо: вы переводите взгляд влево, и расплывчатые предметы на периферии зрения приобретают четкие очертания.

Когда вы водите глазами из стороны в сторону, визуальный мир меняется, а со звуком такого не происходит. Чтобы в воспринимаемом вами звуке что-то изменилось, надо физически повернуть голову. Значит, у этого потока данных другая совокупность признаков.

У осознания тоже имеются свои особенности. Мы касаемся объектов пальцами, берем в руки, исследуем их. Обоняние — пассивный процесс, мы запускаем его, втягивая воздух носом. Ощущение вкуса включается, когда вы что-то кладете в рот.

Сказанное позволяет предположить, что новые потоки данных можно поставлять прямо в мозг (скажем, исходящие от мобильного робота, или же ваши кожно-галванические реакции, или температурные данные в ближнем инфракрасном диапазоне\*). При наличии четкой структуры и петли обратной связи с вашими действиями полученные данные в конце концов приведут к возникновению нового ощущения. Оно будет переживаться не как зрение, слух, осознание, обоняние или вкус, а как нечто совершенно иное.

Конечно, очень сложно представить, каким будет новое ощущение, а по большому счету и вообще невозможно. Чтобы понять почему, попробуйте представить себе новый цвет. Ну же, давайте! Сощурьтесь и напрягите извилины. Задачка, как может показаться, простенькая, а вот и ничего подобного. Ваши попытки бесполезны. Точно так же невозмож но вообразить, как будет ощущаться новое чувство.

И все же, если допустить, что ваш мозг потребляет поступающие в реальном времени данные от дрона (тангаж, рыскание, крен, ориентация и курс), создались бы у вас некие ощущения от этих входных данных — наподобие того, как ощущаются фотоны или волны сжатого воздуха? И стал бы дрон в итоге ощущаться как прямое продолжение вашего

---

\* Ближний инфракрасный диапазон — часть спектра электромагнитного излучения с длиной волн 0,7–200 мкм, которая лежит сразу за красной. Мы ее не видим, но ощущаем как тепло. Прим. ред.

тела? А как насчет информации более абстрактного свойства? Скажем, о работе заводского цеха? Или поступающих твитов? Или состояния фондового рынка? При притоке должных входных данных можно спрогнозировать, что мозг научится напрямую чувственно воспринимать в реальном времени функционирование производства, или различные хештеги, или текущие подвижки в мировых экономических реалиях. Со временем разовьется квалиа — естественный для мозга способ обобщения Big Data.

Правомерен ли этот прогноз или же он из области чистых фантазий? Наконец-то мы в научном смысле подходим к точке истины — моменту, когда у нас появится возможность на практике проверить это.

Если вам трудно представить, как обучиться испытывать новое чувство, разрешите напомнить, что вы уже проделывали это в младенчестве. Посмотрите, как младенец учится пользоваться слухом: он хлопает в ладошки или гулит, и его ушки улавливают проистекающие от этих действий звуки. Поначалу звуковые волны не более чем вызывают электрическую активность в мозге новорожденного, но со временем они начинают ощущаться как звук. Подобный процесс обучения можно наблюдать у глухих от рождения, когда им во взрослом возрасте ставят кохлеарные имплантаты. На первых порах опыт ощущений от искусственной улитки во внутреннем ухе ничего общего со звуком не имеет. Одна приятельница, которой поставили кохлеарные имплантаты, сначала описывала эффект, как безболезненные разряды электрического тока в голове, и у нее не возникало впечатления, что это как-то связано со звуком. Но примерно через месяц они стали «звуком», хотя и плохоньким, словно исходящим от миниатюрного плохо настроенного радиоприемника. Со временем она научилась очень даже неплохо слышать с помощью имплантатов. Точно то же самое происходило с каждым из нас в младенчестве, пока мы учились пользоваться ушами, — просто мы позабыли об этом.

Еще пример: наверное, вы по себе знаете, какой это восторг — впервые поймать взгляд новорожденного. Контакт глаз длится мгновения, но наполняет вас чистой радостью от осознания, что вы — одно из первых существ, которых увидел новоприбывший в наш мир малыш. А если бы выяснилось, что вы вообще невидимы? Чтобы вас увидеть, нужен навык зрения. По моему предположению, зрение — это навык, требующий развития. Мозг воспринимает квадриллионы поступающих от глаз импульсов и в конечном счете обучается извлекать паттерны из всей массы сигналов, а потом из этих извлеченных паттернов извлекать паттерны следующего порядка, потом следующего... пока в конце концов все эти паттерны не сложатся в итоговый, переживаемый нами как зрение.

Мозгу надо научиться видеть, точно так же, как он учится владеть руками и ногами. Новорожденный младенец понятия не имеет, как танцевать свинг, — точно так же он не имеет и субъективного качества зрения. Каждому младенцу приходится учиться использовать набор данных нам природой органов чувств. Принципы, заложенные в этом самообучении, могли бы позволить нам овладеть и новыми органами чувств.

\*\*\*

Сама по себе непреодолимая неспособность представить себе новую разновидность цвета феноменально показательна. Это яркое свидетельство того, что наше восприятие ставит нам преграду, которую мы не в состоянии преодолеть. Так что если нам и удастся доказать саму возможность обрести новое чувство, мы не сможем объяснить его другому. Например, чтобы получить представление о багряном цвете, вы должны приобрести опыт его восприятия. Никакие академические описания не помогут человеку без цветовосприятия понять, что такое багрянец. Точно так же бесполезно объяснять незрячему от рождения человеку, что такое видеть. Можно перепробовать все, что только удастся придумать, а он даже может прикинуться, что понимает, о чем вы толкуете. Хотя в принципе все попытки бесполезны. Чтобы понять, что такое зрение, надо испытать это ощущение.

Точно так же и с принципиально новыми видами чувств — и развитием принципиально новой квалии: сколько ни старайтесь, вы все равно не сможете донести до других людей свое новое ощущение. Во-первых, для него нет соответствующего общепонятного слова. Как бы вы ни силились, вас не поймут. Язык не может объять необъятное, это просто способ обозначения всем известных явлений и объектов. Язык — также система всеобщего соглашения относительно коллективного опыта. Конечно, ничто не мешает вам попытаться выразить словами ваше новое ощущение, но у других людей нет смысловой основы, чтобы понять ваши объяснения.

В отчете о впечатлениях добровольцев, носивших пояс feelSpace (напомню, это устройство через тактильные ощущения указывает направление на магнитный север), авторы эксперимента указывают, что у двоих участников, с их слов, изменилось восприятие. И все же они столкнулись с трудностями, когда пытались описать воспринимаемые ощущения и чувственный опыт пространственного восприятия разных типов. По впечатлениям наблюдателя им настолько не хватало возможностей для описания этого опыта, что выразить свои ощущения хотя бы приблизительно они смогли только через метафоры и сравнения<sup>73</sup>.

В чем тут проблема — в неспособности объектов исследования внятно изъясняться или в непонятливости экспериментаторов? Как отмечают цитируемые авторы, «им оказалось проще обсуждать изменения в восприятии между собой, чем донести свои ощущения до не испытавших их руководителей эксперимента».

Именно так будут обстоять дела с развитием новых видов чувств. Чтобы понять их суть, нам придется загружать данные в собственный мозг и изучать опыт их переживания. И потому, если через несколько десятков лет вы с новообретенными видами чувств ощутите себя однокими и непонятными, правильнее всего будет объединить людей, получающих такие же входные потоки данных, как вы, в сообщество. Тогда вы сможете совместно придумать новое слово для описания вашего внутреннего чувственного опыта (скажем, «зетзенкlev»). Оно будет понятно всем в вашем кругу — и никому за его пределами.

\*\*\*

Есть ли ограничения в количестве новых типов данных, которые мы сможем воспринимать при условии правильного способа их сжатия? Сумеем ли добавить себе шестое чувство за счет входных данных от вибротактильного браслета, а седьмое — в результате прямого подключения к мозгу еще одного входного потока? А потом восьмое — за счет данных с наязычной платы, и девятое, питаемое данными с вибротактильного жилета? Сегодня мы не можем знать, где здесь предел возможного. Все, что нам известно, — это феноменальные таланты мозга распределять свою территорию между входными данными различных видов; мы уже видели выше, как гладко и четко он это проделывает. И, кстати, заметьте, что, когда крысам к соматосенсорной коре подключили инфракрасный датчик, они приобрели способность зрения в инфракрасном диапазоне, но без потери нормальной тактильной чувствительности тела. Так что кора, по всей видимости, предпочитает политике «победителю достается все» содружество чувств, хотя бы и при большем, чем ожидалось, числе миролюбиво настроенных соседей. Тем не менее, учитывая конечность нейронной территории, мы можем предположить, что каждое новое чувство будет снижать разрешающую способность других чувств, а в результате сенсорная мощь нового типа слегка ухудшит уже имеющиеся: скажем, зрение станет чуть менее четким, или слух чуть менее острым, или кожа чуть менее чувствительной. Кто знает? В данном случае наши представления о пределах возможностей мозга — всего лишь чистые предположения и останутся таковыми до тех пор, пока через энное количество лет мы не сможем проверить их практикой.

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

Сколько бы новых чувств мы себе ни добавили, у нас остается еще один интересный вопрос: будут ли они нести эмоциональную нагрузку? Например, аромат свежеиспеченного лимонного пирога и миазмы от чьих-то испражнений на обочине дороги вызывают весьма различающиеся реакции, их не выразишь нулями и единицами на экране; но в обоих случаях это полноценный эмоциональный отклик.

Чтобы понять, в чем здесь дело, спросим себя, почему пирог пахнет хорошо, а испражнения плох. В конце концов, входные сигналы в обоих случаях не так чтобы кардинально различаются: молекулы субстанции испаряются в воздух, который доносит их до вашего обоняния. В молекулах как пирога, так и кала нет ничего такого, что изначально делает их запах приятным или отвратительным: это просто плавающие в воздухе молекулы химических субстанций, аналогичные тем, что источают петуны, кофе, корица, свежая краска, заболоченный речной берег или жареные каштаны. Все эти молекулы связываются с обонятельными рецепторами на слизистой носа.

Но нам нравится запах лимонного пирога, потому что его молекулы возвещают нам о богатом источнике калорий. Запах испражнений омерзителен, поскольку это рассадник патогенов, и эволюция никак не желала, чтобы мы в каких бы то ни было обстоятельствах тащили эту гадость в рот. Точно так же обстоит дело и со зрением: наша зрительная система сталкивается с матрицей фотонов и в зависимости от ее рисунка вы испытываете прилив радости, если фотоны слились в картину зеленого луга, и содрогнетесь при виде обезображенного тела. Таким же образом узоры импульсов во внутреннем ухе доставят вам удовольствие, если в них закодирована сладковкусная мелодия, близкая вашей культуре, — или ужас, если это кричит от боли ребенок. Эмоции просто отражают значение, которое имеют для вас входные данные в контексте ваших целей и под давлением заповедей эволюции. Какие-то эмоциональные реакции развились в процессе становления нашего вида, а другие порождены приобретенным за жизнь опытом: представим, что вам нравится песенка, звучащая по радио, потому что она напоминает о счастливом свидании в школьные годы, а это платье в гардеробе вам неприятно, потому что вы были в нем, когда вас отвергли.

Если модель имени мистера Картошки корректна и мозг действует подобно универсальной вычислительной машине, это наводит на предположение, что входные данные в конечном счете приобретут ассоциации с определенными эмоциональными переживаниями. Что бы ни представлял собой входной поток и какие бы пути ни приводили его в мозг, он вполне может быть нагружен страстями.

Таким образом, если мы направляем в мозг поток данных из интернета, можно ожидать, что в какой-то момент мы внезапно рассмеемся от удовольствия, или расплачемся от душевной боли, или в приливе страха покроемся гусиной кожей — смотря по тому, как сопрягаются новые данные с нашими целями и амбициями. Представьте, что вы воспринимаете новый поток данных о текущем состоянии фондового рынка. И вдруг проскакивает информация о падении акций технологических компаний, а вы крупно вложились в этот сектор. Вы воспримете это как что-то плохое? Не в когнитивном плане (как осознание финансового краха), а как нечто эмоционально плохое, вроде запаха протухшего мяса или муравьиного укуса? Или, наоборот, представим, что информация несет добрую весть: ваши инвестиции подскочили на 6%. Воспримете вы эту новость как что-то приятное? Не в когнитивном плане, а в виде эмоции удовольствия, как если бы услышали смех ребенка или почувствовали вкус еще теплого печенья с шоколадными капельками?

Если вам кажется странной сама возможность подобных эмоциональных реакций на новые потоки данных, имеет смысл напомнить, что весь смысл нашей жизни складывается из потоков данных, наделенных значимостью в контексте наших целей.

Наконец, уместно задать еще один вопрос, прежде чем мы закружимся с этой темой. Не будет ли новое чувство подавлять/переполнять нас или вгонять в стресс?

Я так не думаю. Предположим, ваш незрячий друг убеждает вас, что иметь зрение — только подвергаться лишнему стрессу: «Нет, ты только представь, что у тебя появился еще один поток данных! Миллиарды фотонов нескончаемыми валами накатывают на тебя отовсюду аж от самого горизонта. Каково это? Тебя заполоняют ненужные, лишние сведения вроде того, чем занимаются какие-то люди вдали от тебя. Это же никаких нервов не хватит, когда тебя осаждают такой густой информационный поток, который вдобавок ни на миг не прекращается!»

Зрячего человека зрение не особенно напрягает. Скорее оно нечто среднее между восхитительной приятностью и надоедливой скучой. Вы впускаете его в свою реальность легко и непринужденно, потому что это всего лишь еще один поток данных в числе принимаемых и обрабатываемых мозгом. Вы готовы к новому чувствованию?

В этой главе мы обсуждали формирование новых чувств. Если в процессе эволюции случайные генетические мутации позволяют преобразовывать данные от некоего источника информации в электрические сигналы, мозг может посчитать этот источник новым периферическим устройством «подключи и пользуйся» и начнет дешифровать

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

поступающие от него данные — какими бы они ни были. Например, если подключить глаза к какому-либо лоскутку коры, он станет зрительной корой; если подключить уши — послушно превратится в слуховую; а при подключении тактильных ощущений станет уже соматосенсорной корой. Перед нами одна из остроумнейших уловок Матушки-природы: она так изобретательно сконструировала мозг, что при появлении каждого нового источника данных от мира не появляется нужды заново перекраивать всю архитектуру мозга под новый поток данных. Природа упростила задачу и зная себе придумывает новые периферические устройства: светочувствительные элементы, акселерометры, датчики давления, тепловые ямки, электрорецепторы, магниторецепцию или затейливый нос с осязательными наростами-пальчиками в количестве двадцати двух, или еще что-нибудь хитроумное, что нашепчет ей буйная фантазия.

И прочее, что только ни напридумывают в следующий раз ее дети.

Как мы видели на примерах кохлеарных имплантатов Майкла Хороста и ретинального имплантата Терри Биланда, каждый из нас может воспользоваться благами гибкости мозга, заменив первоначальное периферическое устройство (если оно вышло из строя) на искусственное. При этом устройству-заменителю не требуется говорить на языке мозга, достаточно использовать близкий диалект. А мозг сам разберется, что с этим делать и каким образом.

Далее мы продвинули идею еще на шаг вперед и оценили мощь сенсорного замещения. Способность мозга перестраиваться наделяет его колоссальной гибкостью: он динамически настраивается, чтобы усваивать и использовать новые данные. Это позволяет нам применять электронную плату для передачи зрительной информации через язык, вибромоторчики — чтобы питать слух через осязание кожей, сотовые телефоны — для доставки потоков видеоданных через уши. Кроме того, подобные периферические устройства помогают наделять мозг новыми способностями, в чем мы убедились на примере сенсорного расширения (когда мы расширяем возможности имеющегося у нас чувства), а также сенсорного дополнения (когда мы подключаем мозг к потоку данных совершенно нового для нас типа). Подобные устройства быстро перепрыгнули из разряда громоздких, пристегнутых кабелями к компьютеру, в разряд носимых на теле элегантных беспроводных аксессуаров. И этот стремительный прогресс будет сильнее способствовать росту их использования и изучения, чем любые прорывы в фундаментальной науке.

Как мы увидим в следующих главах, мозг реорганизует схему нейронной сети в стремлении добиться оптимальной презентации внешнего

мира. Поэтому стоит предоставить ему возможность пытаться новыми полезными данными — он сразу обучится постигать их. Правда, к этому прикладываются два условия, к которым мы еще вернемся: данные нового типа усваиваются мозгом лучше, когда они связаны с целями пользователя и согласуются с его действиями.

Современный уровень знаний открывает нам реальные, безгранично разнообразные возможности для сенсорного расширения: зрение в других частях электромагнитного спектра, ультразвуковой слух, подключение к невидимым глазу внутренним переменам в физиологии собственного организма. Кого-то обеспокоит вопрос, а не приведут ли такого sorta технологии к двухуровневому обществу: обладающих новыми сенсорными возможностями и не имеющих таковых. На мой взгляд, риск экономической стратификации общества по данному критерию мал, поскольку сенсорно-расширительные устройства недороги. Подобно тому как технологическая революция принесла смартфоны во все уголки земного шара (в большинстве стран далеко обогнав революцию в области персональных компьютеров), сенсорная технология может быть развернута в масштабах всего мира, причем с меньшими затратами, чем те, что потребовались для распространения смартфонов. Нет, эта технология не есть удел только богатых.

Напротив, подозреваю, что будущее примет еще более причудливые формы, чем примитивное разделение на обладателей и необладателей подобных устройств: в игру вступят различные вкусовые предпочтения. Если сегодня смартфоны ровным слоем покрыли всю планету, то сенсорное расширение увлекает нас в будущее, где разные люди обладают сверхчувствами разного рода. Представьте, что вы наделены сверхспособностью предвосхищать поведение нефтяных фьючерсов, ваш сосед натренирован на восприятие функционального состояния космической станции, а ваша матушка возделывает свой сад, руководствуясь поразительной способностью воспринимать ультрафиолетовое излучение. Не подойдем ли мы к грани, образно говоря, внутривидового видеообразования, когда наш вид разделится на множество подвидов? Кто может это знать? В лучшем случае воображение подсказывает нам сценарий в голливудских традициях, где супергерои, каждый со своей уникальной сверхспособностью, объединяются, словно фрагменты пазла, на борьбу с главным злодеем.

Дело в том, что будущее в принципе предсказывать трудно. Как бы ни складывались обстоятельства, одно из них на нашем пути к горизонтам будущего более или менее ясно: чем дальше, тем чаще мы будем сами выбирать, какие периферии plug-and-play подключать к своему телу.

## Глава 4. Что в него ни поступает, все он, умница, постигает

Мы больше не тот естественно-биологический вид, который обречен миллионами лет дожидаться очередного дара Матери-природы. Нет, как всякий заботливый родитель, она наделила нас мыслительными способностями и предоставила нам возможность по собственному разумению строить свой чувственный опыт (рис. 4.20).

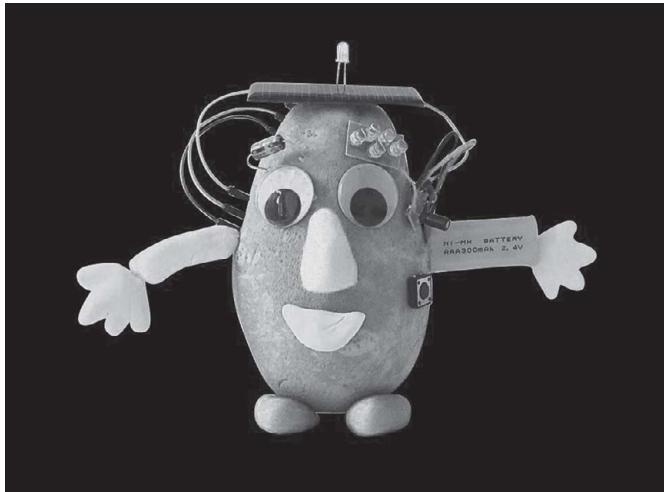


Рис. 4.20. Подключил — и пользуется!

Все рассмотренные примеры касаются случаев, когда наши органы чувств направляют мозгу *входные* данные для последующей обработки. А как насчет другой его обязанности — генерировать *выходные* сигналы конечностям тела? Насколько гибок мозг в данном аспекте? Могли бы вы украсить себя дополнительными парами рук, механическими ногами или, скажем, присоединить к себе робота, чтобы он действовал на другом конце света, подчиняясь силе вашей мысли?

Хорошие вопросы, вы не находите?

# ГЛАВА 5

## КАК РАЗДОБЫТЬ СЕБЕ ТЕЛО ПОЛУЧШЕ

**Соблаговолит ли реальный док Ок проголосовать «за» всеми руками?**

В третьем выпуске комикса «Удивительный Человек-паук» (дата релиза — июль 1963 года) ученый Отто Гюнтер Октавиус подключает к мозгу устройство, позволяющее управлять четырьмя дополнительными руками-роботами. Металлические щупальца обеспечивают такую же точность движений, как естественные конечности, благодаря чему ученый может безопасно для себя работать с радиоактивными материалами. Каждая роборука действует самостоятельно — как у вас, когда вы одной рукой держите руль, другой меняете радиостанцию на магнитоле, а ногой тем временем давите на газ.

К несчастью для доктора Октавиуса, произошедший из-за случайной утечки радиации взрыв повреждает его мозг, чем обрекает на жизнь злодея-преступника и заклятого врага Человека-паука. Движимый но-вообретенным осознанием собственного бессмертия, доктор Октавиус начинает использовать дополнительные руки-щупальца с дурными целями: вскрывает сейфы, карабкается по стенам зданий и осваивает новые методы многорукопашного боя. В своей новой личине он приобретает дурную славу как доктор Осьминог, или док Ок.

Когда в 1963 году вышел этот выпуск комикса, сама идея, что к мозгу можно напрямую подключить роботизированные конечности и легко управлять ими, как «родными» руками, воспринималась исключительно как научная фантастика. Поражает, однако, скорость, с какой данная идея перешагнула из области фантастики в реальную жизнь.

\*\*\*

Выше мы видели, что мозг реорганизует себя, если его владелец тянет конечность, как в случае, когда по прихоти войны скрестились пути

мушкетной пули и рукой доблестного Горацио Нельсона. Но мы коснулись этой истории только в части входных данных. На выходе управляющая движениями тела кора (моторная карта) тоже адаптировалась. Когда нервная система догадывается, что утратила контроль над ранее имевшейся конечностью, кортикалная проекция утраченной конечности сжимается<sup>1</sup>. Мозг перестраивается под соответствие новому плану тела.

Рассмотрим случай женщины — условно назовем ее Лаурой, — которая в результате серьезной травмы потеряла кисть руки<sup>2</sup>. Ее первичная моторная кора в течение каких-то недель начала трансформироваться. Моторные зоны соседних с кистью руки мышц (ее бицепсы и трицепсы) мало-помалу аннексировали кортикалную территорию, ранее отвечающую за кисть. Можно выразиться и по-другому: нейронам, которые прежде приводили в действие кисть руки Лауры, переписали должностные инструкции и подключили эти нейроны к бригаде, отвечающей за движение мышц плеча. Позже ученые изучили моторную карту Лауры, через череп посылая внутрь мозга слабые магнитные импульсы (неинвазивный метод транскраниальной магнитной стимуляции) и отмечая, какие мышцы сокращаются в ответ. Метод позволил определить, что за несколько недель кортикалная область, отвечающая за мышцы плеча, расширилась.

В следующих главах мы разберем, каким образом мозг проделывает такой финт, а пока сосредоточимся на вопросе: почему моторная система адаптируется подобным образом? Отвечаю: моторные зоны оптимизируют себя под управление наличным двигательным «оборудованием». Данный принцип открывает двери множеству возможных вариантов планов тела.

## Никакой стандартной кальки!

Если обозреть животное царство, обнаружится великое разнообразие причудливых форм и типов конституции тела — от муравья до крота-звездорыла, от ленивца до рыбы-дракона, от осьминога до утконоса.

Но вот загадка: все твари в нашем животном царстве (в том числе и люди) обладают на удивление похожими геномами.

Как удивительные создания природы исхитряются искусно владеть настолько разнообразным двигательным инструментарием — хватательными хвостами, острыми когтями, необычной формы гортанями, щупальцами, усами и усиками, хоботами и крыльями? Почему горные козлы

## Живой мозг

умеют шустро взбегать по головокружительным скалистым склонам? А совы — пикировать точнехонько на зазевавшуюся вочных потемках мышь? И как лягушки навострились так ловко ловить языком мушек?

Чтобы понять это, обратимся к модели мозга имени мистера Картофельная Голова, подразумевающей, что к мозгу можно приторочить самые разные устройства ввода данных, как, впрочем, и вывода. В этом смысле Мать-природа позволяет себе экспериментировать с самыми немыслимыми моторными технологиями plug-and-play. Фундаментальные принципы действия мозга не требуется каждый раз перестраивать под ту или иную двигательную периферию — будь то пальцы, ласты или плавники; две ноги, четыре или все восемь; руки, когтистые лапы или крылья. Двигательная система сама придумывает, как приводить в действие доступные ей механизмы.

Возможно, в этом месте вы воскликнете: «Погодите-ка, есть вопрос! Если тела способны принимать самые странные формы, повинуясь случайному щелчку генома, почему мы не видим людей, родившихся с необычными вариациями строения тела?»

В том-то и дело, что видим. Например, иногда дети рождаются с хвостом<sup>3</sup> (рис. 5.1), доказывая тем самым, с какой легкостью костяшки генетического домино опрокидываются, вызывая необычные вариации планов тела.



Рис. 5.1. Некоторые дети рождаются с хвостом, демонстрируя своим примером, что генетические вариации способны спровоцировать крупные изменения в архитектуре тела

Помимо хвоста у новорожденного могут присутствовать лишние конечности. Например, в Шанхае не так давно на свет появился мальчик Цзе-Цзе с полностью развитой третьей рукой<sup>4</sup>. Помимо правой руки у ребенка две нормально развитые левые руки, одна чуть впереди и ниже другой (рис. 5.2).



Рис. 5.2. Цзе-Цзе родился с дополнительной рукой

Иногда причиной подобных аномалий становится близнец-паразит: это когда зародыш одного близнеца слишком слаб для нормального развития и его поглощает более сильный, здоровый зародыш. Только у Цзе-Цзе случай совсем другой: это его генетическая программа велела телу вырастить третью руку. Бригада китайских хирургов провела малышу многочасовую операцию по удалению «внутренней» левой руки — трудное решение, поскольку обе левые руки были хорошо развиты. Чаще всего дополнительная конечность сморщена и явно недоразвита, что облегчает врачам выбор, которую из двух удалить. Между тем у каждой из двух левых ручек Цзе-Цзе имелась своя лопатка, что повышало сложность и риски операции.

Хвост или лишняя конечность у новорожденных показывают, что строение тела может специфически и явно меняться под действием крохотных генетических искажений. Стоит ли говорить, что такого рода генетические колебания, хотя и слабо выраженные, наблюдаются везде и повсюду вокруг нас: у кого-то руки длиннее обычного или пальцы

## Живой мозг

коротковаты, большой палец ноги короче соседнего, полнее бедра или шире плечи.

Кстати, хотя наши ближайшие родичи шимпанзе генетически почти нам идентичны, строением тела они во многом отличаются от нас: у них выше располагается точка фиксации двуглавой мышцы плеча, бедра сильнее развернуты наружу, а пальцы нижних конечностей длиннее, чем у нас. Расположенному в темном тронном зале мозгу обезьяны легко заставить ее тело раскачиваться на деревьях и ходить на костяшках пальцев, а человеческому мозгу нетрудно понять, как соревноваться в пинг-понге и танцевать сальсу. В обоих случаях мозг элегантно определяет, как лучше всего управлять телом, в которое он встроен.

Мы поймем всю мощь этого принципа, если обратимся к примеру Мэтта Штуцмана, человека, родившегося без рук (рис. 5.3). Еще в юности его очень увлекла стрельба из лука, и он обучился управляться с луком и стрелами при помощи пальцев ног.

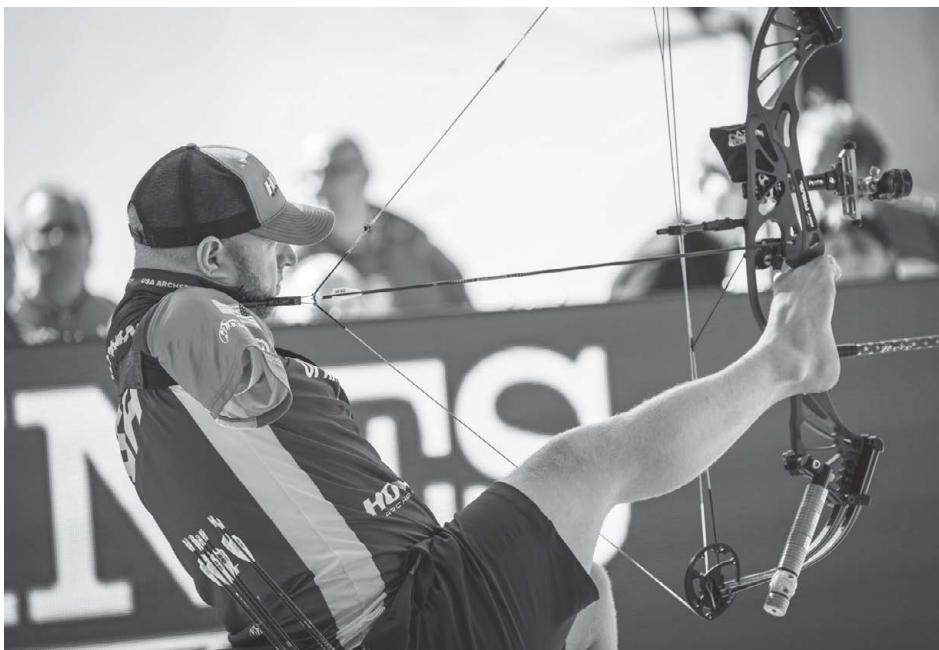


Рис. 5.3. Мэтт Штуцман, «безрукий лучник»

Плавным движением пальцев ноги Мэтт накладывает стрелу на тетиву, затем правой ногой поднимает лук — вся конструкция лямкойкрепится к плечу, позволяя поднимать лук на уровень глаз. Затем ногой

же натягивает тетиву, выдвигая ногу вперед, и, поймав мишень в прицел, выпускает стрелу. Мэтт не просто талантлив в стрельбе из лука, он лучший в мире лучник: на момент написания книги держит мировой рекорд в самой длинной непрерывной серии точных выстрелов из лука. Думается, не такое будущее могли бы напророчить безрукому младенцу врачи. Вероятно, они недооценивали, на какие ухищрения готов пойти его мозг, чтобы приспособить свои ресурсы к решению задач внешнего мира.

Примеры подобной гибкости мозга во множестве наблюдаются среди животного мира. Так, у собаки Фэйт от рождения нет передних лап, и она с самого щенячества училась передвигаться на задних лапах, то есть бипедально, как человек. Хотя мы могли бы предположить, что собачий мозг генетически запрограммирован под четвероногую локомоцию тела с полагающимся собаке строением, Фэйт демонстрирует нам великую готовность мозга передвигать по миру вверенное ему тело, обходясь тем двигательным аппаратом, какой дала нещедрая природа (рис. 5.4).



Рис. 5.4. Мозг приспосабливается к возможностям тела. Фэйт вынуждена передвигаться на двух задних лапах из-за отсутствия передних конечностей. Ее двигательные системы приспособились к особенностям тела и позволяют вести нормальную (если бы не назойливость папарацци) для собаки жизнь

## Живой мозг

Случаи безрукого лучника и двуногой собаки ярко высвечивают тот факт, что мозг не предназначен заранее для некоего конкретного тела, а вместо того сам адаптируется к уже имеющемуся, чтобы обеспечить ему движение, взаимодействие с миром и выживание. Действие этого принципа не ограничивается телом, в котором вы рождены, а распространяется на все возможности, какие может подбросить судьба. Посмотрите на Сэра Блейка, бульдога из Калифорнии, который освоил катание на скейтборде (рис. 5.5). Пес вспрыгивает на доску и отталкивается от земли передней лапой, чтобы разогнаться. Набрав скорость, он аккуратно ставит лапу на скейтборд и весь отдается езде. Как и человек, Сэр Блейк искусно смещает вес тела, чтобы объезжать препятствия. А как накатается, ждет, пока скейтборд почти остановится, и соскакивает с него. В эволюционной истории собаки нет даже намека на присутствие колес, поэтому пример Сэра Блейка подчеркивает способность мозга адаптироваться под новые возможности.



Рис. 5.5. Хотя эволюция выдала бульдогам лапы, а не колесики, Сэр Блейк без труда приспособился к новому способу передвижения

Вот еще пример: собака по кличке Шугар (Сахарок) освоила искусство серфинга (рис. 5.6) и даже удостоилась места на Международной аллее славы собак-серферов. Если отвлечься от Шугар, впору бы удивиться, что на свете есть такая аллея. Собачьи мозги обычно не подвергают глубоким научным исследованиям навыка маневрирования на лонгборде не хуже человека — а могли бы. Главное, чтобы собаке подвернулась возможность, а ее двигательные системы сами разберутся, как и что делать.



Рис. 5.6. В 2017 году Шугар завоевала титул «Лучшая в серфинге» на ежегодных соревнованиях собак-серферов Surf-A-Thon в Хантингтон-Бич. С ней соперничали собаки самых разных пород, от золотистых ретриверов до карликовых шпицей

Сэр Блейк, Шугар и их менее удачливые соперники феноменально искусны в катании по улицам и по волнам, а в иных случаях даже заткнут за пояс некий креативный биологический вид (не будем показывать пальцами), который изобрел эти спортивные занятия. Как собакам удается достичь таких вершин мастерства?

## Моторный лепет

Младенец учится использовать рот и дыхание для формирования речи без помощи генов и Википедии — он просто лепечет. Звуки вылетают из крохотного ротика, и маленькие ушки улавливают их, а мозг сравнивает, насколько близки издаваемые им звуки тем, которые он слышит от родителей. Здесь малышу очень на пользу восторги пап и мам, когда у него получается произнести определенные сочетания звуков, как и отсутствие позитивного отклика на другие звуковые комбинации. Таким образом, постоянная обратная связь помогает ребенку улучшать навык речи, пока он не начнет гладко изъясняться на английском, китайском,ベンガル語, яванском, амхарском, чукотском или любом другом из семи с лишним тысяч языков, на которых говорят обитатели нашей планеты.

Точно так же мозг младенца учится моторным движениям — посредством моторного лепета.

Понаблюдайте за младенцем в кроватке. Сколько хаотических движений он совершает: то пытается укусить большой пальчик на ножке, то стукается обо что-то лбом или дергает себя за волосики, сгибает-разгибает пальчики и прочее в том же духе. Так он учится сопоставлять свои действия с получаемыми в результате сенсорными ощущениями, то есть понимать язык собственного тела: он подмечает, как исходящие вложенные усилия связаны со следующими сигналами. Подобным образом мы все в какой-то момент научаемся ходить, отправлять в рот сладкие земляничины, держаться на поверхности воды в бассейне, висеть на перекладинах турника и прыгать «ноги вместе — ноги врозь».

Но, что еще больше радует, ту же нехитрую методу обучения мы пускаем в ход, когда добавляем нашему телу всевозможные расширения. Возьмем катание на велосипеде — эволюция, конструируя наш геном, даже не мыслила, что будет изобретено такое средство передвижения. На заре нашего биологического вида мозг человека больше приспособился лазать по деревьям, притаскивать в пещеру пищу, мастерить примитивные орудия и ходить на большие расстояния. Успешная езда на велосипеде предъявляет нам новый набор вызовов: удерживать корпус в равновесии, менять направление движением рук и мгновенно останавливаться, сжимая пальцы. Невзирая на все эти хитрости, любой семилетний мальчишка может продемонстрировать, что добавленное к плану тела расширение (велосипед) легко и непринужденно присоединяется к имеющемуся в моторной коре эскизу тела.

Но обычными велосипедами дело не ограничивается. Инженер-механик Дестин Сэндлин получил от приятеля весьма оригинальное транспортное средство: при повороте руля влево переднее колесо благодаря хитро сконструированной цепной передаче поворачивается вовсе даже вправо (рис. 5.7). И наоборот. Дестин искренне верил, что ему не составит труда освоить затейливый подарок, потому что концепция проста и понятна: поворачивай руль в сторону, противоположную желаемой, и все дела. Как оказалось, ездить на таком велосипеде невыносимо сложно, потому что для этого потребовалось разучиться нормально управлять рулевым колесом. Дестин убедился, что натренировать двигательную кору на новый способ руления гораздо труднее, чем постичь разумом, как это делается, ведь сам принцип работы он знал. Это, однако, не означало, что у него получается правильно рулить велосипедом на практике.

И все же Дестин начал понемногу приобретать споровку. При каждой попытке совершить какое-либо действие внешний мир присыпал ему обратную связь (заваливаешься влево; сейчас врежешься в почтовый ящик; тебя несет под колеса грузовика), сообразуясь с которой

Дестин корректировал последующие движения. Через несколько недель ежедневной практики он уже вполне сносно ездил. Чудо-велосипед он освоил тем же способом, каким дети учатся ездить на обычном: через моторный лепет.



Рис. 5.7. Велосипед с обратным действием рулевого колеса

Если вам случалось водить машину в другой стране с непривычной для вас стороной движения и нетрадиционным расположением руля, вы знаете, какое это тяжкое испытание. Например, если вы привыкли к правостороннему движению и оказались в Великобритании, где оно левостороннее (или наоборот), то много раз по ошибке свернете не так и не туда, прежде чем адаптируетесь к новым условиям. Но в конечном счете все равно освоите езду, потому что ваша зрительная система подмечает последствия каждого действия и соответственно корректирует их. Если все пойдет хорошо, нервная система успеет внести нужные поправки в ваши действия, прежде чем вы въедете в стог сена.

\*\*\*

Наверное, кажется странным, что мы способны обучаться управлять телом разными способами, притом что двигательная кора у нас одна. К счастью, мозг по контексту безошибочно угадывает, какую программу запускать. Он применяет соответствующую схему (шаблоны для организации разных категорий информации), и в результате вы при езде на велосипеде двигаете себя вперед за счет круговых движений бедер, а при беге трусцой машете руками и поочередно переступаете ногами.

Вот пример, как я недавно заставил себя на уровне сознания испытать наличие такой схемы в собственной голове. В моем грузовичке отвалилось зеркало заднего вида. Я собирался тут же устранить поломку, но

был настолько погружен в написание этой книги, что несколько недель вообще ездил без зеркала. В конце концов я все же выкроил время заехать в автосервис, потому что одна маленькая странность буквально сводила меня с ума: когда я был за рулем, мой взгляд сам собой то и дело устремлялся вправо и вверх и я ловил себя на том, что смотрю на кроны деревьев по обочине дороги. Очевидно, что глаза привычно обращались туда, где раньше висело зеркало, с намерением оценить обстановку сзади. Но, разумеется, на кухне, в офисе или в спортзале я никогда не стреляю глазами вверх и вправо, желая выяснить, что творится у меня за спиной; это происходит, только когда я еду за рулем. Интересно, что я совершенно не отдавал себе отчета в том, что такая схема всегда присутствовала в моей голове, хотя она в каждый момент оценивала возможности маневра, учитывая положение других участников движения, и соответствующим образом корректировала мои двигательные функции. Точно так же во время пробежек я никогда не сжимаю пальцы, чтобы остановиться, а при езде на велосипеде не поднимаю ногу, чтобы через что-то перешагнуть.

Аналогично и мозг Дестина выучил новую схему. Когда он наконец-то освоил «неправильный» велосипед, выяснилось, что ездить на обычном, правильном, он не способен. Правда, длилось это недолго, и, немного попрактиковавшись, Дестин вернул себе навык езды на обычном велосипеде. Теперь он легко пересаживается с одного на другой, а мозг просто следует той или иной схеме, чтобы приводить в действие мышцы сообразно контексту.

Но вернемся к моторному лепету. Он не только служит для младенцев и велосипедистов способом научиться правильно двигаться, но и подарил продуктивный подход робототехнике. Подводный робот Starfish («Морская звезда») на ходу выстраивает модель своего «тела» и в процессе учится, какие движения ему доступны (рис. 5.8). Программирования в традиционном смысле ему не требуется; он самостоятельно изучает свое устройство<sup>5</sup>.

Как младенец сучит ручками-ножками, так Starfish пробует осуществить какое-то движение и оценивает последствия: по показаниям гироскопов определяет, насколько при этом наклонилось центральное «тело». Вытягивая конечность, робот не получает информации ни о своем строении, ни о характере взаимодействия с внешней средой, но обратная связь сужает пространство возможностей: иными словами, сокращает число вариантов для построения гипотезы о том, что он собой представляет. Затем настает черед следующего движения, но оно будет неслучайным, поскольку робот постарается еще четче очертить границы оставшихся после предыдущего движения гипотез.



Рис. 5.8. Появившийся на свет с некоторым числом конечностей, шарниров и приводов робот Starfish сам «соображает», что представляет собой его «тело» и как им двигать

Выбирая каждое последующее движение так, чтобы еще сильнее раздробить поле гипотетических возможностей, Starfish все больше проясняет картину строения своего «тела»<sup>6</sup>.

Самообучаясь, робот привыкает использовать собственные приводы, и если вы отсоедините одну его конечность, он переосмыслит модель своего строения с учетом ее отсутствия. Как Терминатор: когда Сара Коннор сожгла его и переломала ему ноги, он продолжал функционировать, хотя уже с другим строением тела, и по-прежнему преследовал свою цель.

Создавать самообучающихся роботов — путь более эффективный и гибкий, чем программирование на предустановленный набор движений. Вот и Мать-природа, располагая всего несколькими десятками тысяч генов для конструирования живых тварей, по всей видимости, не может спрограммировать весь спектр потенциальных действий, которые они

могли бы производить в условиях реальной жизни. Какой же у нее остается выход? Правильно, выстроить систему, которая сама себя познает.

Именно эта остроумная придумка позволяет серферам и скейтбордистам собачьего племени оттачивать свое мастерство. Они пробуют различные варианты движений, положений тела, поз и равновесий (моторные пробы) — и оценивают результат. Если я наклонюсь влево, смогу ли я удержаться на волне или плюхнусь в холодную воду? Если я буду отталкиваться задней лапой, опираясь на три другие, продолжит ли эта доска ехать, а хозяин верещать от восторга или я с размаху врежусь в пожарный гидрант? Обратная связь позволяет моторной системе отрегулировать миллионы параметров и в следующий раз действовать успешнее. Таким образом организм выстраивает модель своего взаимодействия с реальностью. Он усваивает свои возможности и результаты действий, делая поправку на окружающую среду. Через эту непрерывно действующую петлю обратной связи между внутренним и внешним миром младенцы, собаки-легкоатлеты и робот Starfish учатся ориентироваться в строении своего тела.

Петля обратной связи, позволяющая оценить последствия выполненного действия, дает ключ к пониманию не только моторных, но и социальных проб. Задумайтесь о том, как вы учились (и продолжаете учиться) общению с другими людьми. Вы все время предъявляете миру то или иное социальное действие, оцениваете обратную связь и адаптируете к тем или иным обстоятельствам свое поведение. В молодости мы скиталяемся в пространстве возможностей, примеряя к жизненным перипетиям те или иные проявления своего характера. Не лучше ли отнести к этой ситуации с юмором? А в этой — вызывающе скрестить на груди руки? А может, лучше расплакаться и вызвать сочувствие? Однажды поступив определенным образом в конкретной ситуации, мы понимаем, что это был единственный шаг, и в дальнейшем склонны придерживаться такой линии поведения, пока обстоятельства не потребуют обновить ее. И точно так же, как человек, который то ездит на горном велосипеде, то катается на коньках или летает на дельтаплане, мы усваиваем разные схемы поведения в разных социальных ситуациях. В младенчестве мы опирались на обратную связь от своих движений и точно так же в сознательном возрасте действуем сообразно социальной обратной связи. Спасет ли конкретную ситуацию твердое руководство? Добьюсь ли я своего добрым словом? Правда ли, что этот соленый анекдот пройдет на ура в гостях, а на совещании у начальства только опозорит меня?

Непрерывное тестирование реальности — прокатит или не прокатит? — возможно, также является для нас способом обучаться мыслить.

С позиций вашего мозга мышление имеет замечательное сходство с движениями. Буря нейронной активности, заставляющая вашу руку подняться, мало чем отличается от нейронной бури, которая зарождается в мозге, когда вы обдумываете, как утешить отчаявшегося друга, удивляетесь, куда мог подеваться проклятый носок, или прикидываете, что заказать на обед. Для мозга и обдумывать что-то, и поднимать руку или ногу — все едино; как мозг отдает распоряжения пнуть, нырнуть или схватить, так, вероятно, мышление дает нам команды следовать тем или иным путем в мысленном пространстве. Проще говоря, в процессе мышления вы передвигаете не чашки с кофе, а понятия, складываете не салфетки, а идеи и представления. И начинается мышление с тех же самых проб: вы генерируете мысль и оцениваете ее последствия. Многие мысли хорошо вписываются в реалии мира («Если я потяну за этот шнур, заработает газонокосилка»), тогда как от других мыслей ни толку ни проку («Что будет, если я швырну блинчик через стол?»). Подобно движениям и речи, мышление учится наилучшим образом функционировать в этом мире.

Возвращаюсь к Сэру Блейку, Шугар и их спортивным соперникам. Можно не только получать удовольствие, наблюдая за ними, но и обратить внимание на важный принцип: если генетические причуды дали собаке две лапы вместо четырех, если она вдобавок к лапам нежданно-негаданно разжилась колесиками или доской для серфинга в дополнение к скелету, ее мозгу нет нужды внутренне реконструироваться — он просто перенастроится.

Представьте, как плодотворна такая стратегия для создания биоразнообразия. Мозгу с его нейронными связями не нужно целиком и полностью меняться при каждом генетическом изменении в строении тела. Он приспособливается к переменам. Именно это свойство мозга помогло эволюции так успешно создавать живых тварей под любые условия обитания. Неважно, что подходит данной среде — копыта или ноги, плавники или руки, хоботы или хвосты, когти или пальцы, — Материи-природе в любом случае не придется прилагать лишних усилий, чтобы приспособить новое существо к нормальной жизни. Эволюция, в сущности, не способна работать по-другому: она попросту не смогла бы так расторопно действовать, не будь ей так легко варьировать строение тел, а мозгу — без труда подстраиваться под эти вариации.

\*\*\*

Столь обширная гибкость мозга объясняет, почему мы так легко водворяемся в новые тела. Вспомним Эллен Рипли, героиню фильма «Чужой». В кульминационной сцене она в смертельной схватке с мерзким, скользким

Чужим забирается в гигантский робот-скафандр, который усиливает ее движения мощными металлическими конечностями наподобие человеческих. Поначалу Эллен неуклюже пошатывается, но, немного попрактиковавшись, уже может наносить сокрушительные удары по сощащимся слизью сусалам Чужого. Рипли быстро учится владеть новым гигантским телом, благо ее мозг корректирует взаимосвязи между ее командами скафандром («Замахнуться рукой!») и входными сигналами («Где теперь эта огромная правая ручища?», «Не слишком ли сильно меня кренит влево?»). Подобные новые связи легко усваиваются, что демонстрируют своим примером операторы вилочных погрузчиков, крановщики и хирурги-лапароскописты — все они каждое утро приходят на работу, чтобы ловко управлять своими затейливыми «новыми телами». Обладай мозг Эллен Рипли узкой специализацией управлять только двухметровым человеческим телом стандартного образца, она пошла бы на закуску Чужому.

Мой пример взят из научной фантастики, но принцип, лежащий в его основе, применим к роликовым конькам, одноколесным велосипедам, креслам на колесиках, доскам для серфинга, сегвеям, скейтбордам и сотням других устройств, которые мы подвязываем, пристегиваем или иным способом прикрепляем к телу в качестве его продолжения. Специфические особенности этих устройств, их вес, сочленения, двигательные возможности и управление ими — словом, все, что мы можем с ними делать, — находят путь к нашему мозгу и встраиваются в его нейронную сеть. На заре авиации пилоты с помощью тросов и рычагов превращали крылатые машины в продолжение своего тела<sup>7</sup>. Разумеется, нечто очень похожее проделывают современные летчики: их мозг выстраивает внутри себя представительство авиаэйдера, воспринимая его как часть тела. То же самое происходит у пианиста-виртуоза, вальщика леса с бензопилой и пилота дрона: мозг встраивает в себя их рабочий инструмент как естественное расширение тела и соображает, как этим инструментом управлять. Трость слепца при движении не просто выставлена вперед, а встроена в его нейронные связи.

Теперь задумайтесь, какие перспективы все это откроет перед человечеством в ближайшем будущем. Как вам идея дистанционно управлять роботом, причем только силой мозговой активности? В отличие от Эллен Рипли, вам даже переселяться в него не придется: вы будете не совершать движение, а просто думать его. Если захотите, чтобы робот поднял руку, он тут же сделает это. А если пожелаете присесть на корточки, выполнить пируэт или подпрыгнуть, робот исполнит вашу мысленную команду мгновенно и безошибочно. Это из области фантастики, скажете вы. Вовсе нет, мы с вами уже на пути в нашу ближайшую реальность.

## Моторная кора, маршмеллоу и Луна

В начале декабря 1995 года Жан-Доминик Боби находился на вершине успеха: он был главным редактором знаменитого журнала *Elle* и вращался в высших кругах французского общества.

И вдруг, как гром среди ясного неба, Боби поразил тяжелейший инсульт, после которого от погрузился в глубокую кому.

Двадцать дней спустя Жан-Доминик вышел из комы. Он находился в ясном сознании, видел и понимал, что происходит вокруг, слышал речь находившихся в его палате людей — но не мог двигаться. Не мог шевельнуть рукой или ногой, пальцами, мышцами лица, не мог издать ни звука, ни крика. Во всем теле ему не отказался служить единственный маленький орган — левое веко. В остальном Боби оказался в заточении своего неподвижного тела.

Со временем, благодаря усилиям и терпению двух настойчивых врачей-терапевтов, Боби сумел восстановить общение с миром, но очень заторможенное. Нет, дар речи к нему не вернулся, но он мог поднимать и опускать действующее левое веко. Одна из терапевтов медленно произносила буквы французского алфавита в порядке частоты их употребления в языке, а Боби опускал веко, когда она доходила до нужной буквы. Врач записывала букву и заново начинала перечисление. В результате, с мучительной медлительностью — по две минуты на слово, Боби снова начал общаться. Беспримерное терпение помогло ему надиктовать книгу, где он рассказал, каково живется с синдромом «запертого человека». Живость и изящество слога составляли разительный контраст с бесчувствием его тела. Боби сумел с максимальной силой выразить муки, которые испытывает человек, лишенный общения с миром. Он описал, например, пронзительную тоску от вида забытой его помощницей сумочки, в полуоткрытом нутре которой виднелись ключ от номера в отеле, билет в метро и стофранковая купюра. Бесхитростные и обыденные, эти предметы напоминали ему о жизни, проявлений которой ему больше никогда не испытать.

Книга Боби «Скафандр и бабочка»\* увидела свет в марте 1997 года. В первую же неделю было продано 150 тысяч экземпляров, и книгу признали бестселлером номер один по всей Европе. Через два дня после выхода книги автора не стало. Миллионы людей вот уже долгие годы не могут без слез читать исповедь Боби. Перелистывая ее страницы, они, наверное, впервые в жизни начинают ценить простое удовольствие от

\* Боби Ж.-Д. Скафандр и бабочка. М. : Рипол Классик, 2009. Прим. пер.

## Живой мозг

того, что у них нормально функционирует командный центр и играючи управляет с громоздкими мясистыми конечностями, причем так искусно, что мы пребываем в блаженном неведении о сложнейших операциях, происходящих под сводами нашего черепа.

Почему Боби утратил способность двигаться? В нормальных обстоятельствах, когда мозг решает пошевелить вашей рукой, соответствующий паттерн нейронной активности посыпает двигательную команду по нисходящим проводящим путям в спинной мозг, а оттуда — периферическим нервным волокнам, где электрические сигналы преобразуются, выделяя нейромедиаторы, которые заставляют мышцы сокращаться. Но у Боби сигналы не могли покинуть мозг, чтобы совершить далекое путешествие по нервным путям к телу. Его мышцы не получали никаких команд.

Надо надеяться, в будущем мы научимся исцелять спинной мозг, но на данный момент не умеем этого делать. В итоге тут видится единственный выход: а что, если бы у врачей была возможность не отслеживать моргания Боби, а напрямую измерять импульсы в его мозге? Что, если бы нам удалось перехватить и понять команды, которые нейронные цепочки пытаются отправлять мышцам, а потом в обход поврежденных тканей донести эти послания до мышц и заставить их выполнять соответствующие действия?

Через год после смерти Боби исследователи из Университета Эмори имплантировали интерфейс «мозг — компьютер» Джонни Рэю, пациенту с синдромом «запертого человека», и тот прожил достаточно времени, чтобы обучиться управлять компьютерным курсором, просто воображая нужное действие<sup>8</sup>. Его моторная кора лишилась возможности передавать сигналы через поврежденный спинной мозг, зато их воспринимал и передавал компьютеру имплантат.

К 2006 году парализованный американский футболист Мэтт Нэгл научился с большим трудом сжимать и разжимать ладонь искусственной руки (рис. 5.9), регулировать освещение, открывать электронную почту, играть в видеоигру Pong и рисовать окружность на экране компьютера<sup>9</sup>. Эти способности проявились благодаря вживленной в моторную кору плате размерами  $4 \times 4$  мм почти с сотней электродов. Мэтт представлял, какое действие совершают его мышцы, мысль активировала моторную кору, позволяя ученым фиксировать активность и более или менее определять, что он хочет сделать.

Пусть технология, которую ученые применили в случаях Джонни и Мэтта, была, как говорится, создана на коленке и не отлажена, но главное в том, что она доказала возможность вернуть парализованным

дар движения. К 2011 году группе нейробиологов из Питтсбургского университета под руководством Эндрю Шварца удалось создать протез руки, почти не уступающей настоящей в восприимчивости и двигательных возможностях.



Рис. 5.9. Управление роботизированной рукой за счет мысленного представления конкретного движения

Участвовать в испытании вызвалась Джен Шайерманн, парализованная в результате спиноцеребеллярной атаксии\*. С согласия Джен ей провели нейрохирургическую операцию, чтобы дать возможность действовать протезом<sup>10</sup>. После операции сигналы считаются непосредственно с моторной коры Джен. Теперь она может представить какое-нибудь движение рукой, и протез, повинуясь ее мысли, выполняет его. Располагается протез на некотором отдалении от Джен, что вовсе не меняет дела: через провода, соединяющие ее мозг с компьютером и роборукой, женщина может послать ей команду плавно повернуться и взять нужный предмет, притом получается это ничуть не хуже, чем много лет назад, когда у Джен действовала собственная рука. В норме, когда у нас возникает мысль что-либо сделать рукой, соответствующие сигналы отправляются

\* Спиноцеребеллярная атаксия — нейродегенеративное наследственное заболевание, при котором медленно, но постоянно ухудшаются движения ног, рук, глаз, других органов. Известно около двадцати разных форм этого заболевания. Лечения в настоящее время не найдено. Прим. ред.

## Живой мозг

из моторной коры в спинной мозг и затем по периферическим нервным путям передаются мышечным волокнам. У Джен сигналы, считываемые с ее мозга, путешествуют другим маршрутом — не по нейронным путям к мышечным волокнам, а по проводам, ведущим к моторчикам в протезе. Постепенно Джен принаршивается все лучше и лучше действовать искусственной рукой, отчасти благодаря более совершенной технологии, но также и потому, что ее мозг несколько подправил свою нейронную сеть, чтобы наилучшим образом управлять новой конечностью — точно так же, как если бы это был велосипед с обратным рулем, доска для серфинга или робот-скафандр Эллен Рипли (рис. 5.10).



Рис. 5.10. Управляемый силой мысли робот-костюм для парализованных. Такого рода нейропротезные устройства пока не ушли дальше ранних стадий проектирования, но мало-помалу приближаются к границам возможного

Как говорит Джен, «если уж на то пошло, я все же больше предпочитаю иметь мозг, чем руки»<sup>11</sup>. Потому что если у вас есть мозг, то к нему можно пристроить новое тело, а наоборот — никак.

В настоящее время активно разрабатываются интерфейсы «мозг — компьютер» для восстановления подвижности всего тела парализованных<sup>12</sup>. Так, чтобы вернуть им двигательную способность, группа ученых в рамках международного проекта Walk Again («Вновь ходить») работает над подобием экзоскелета\* на все тело с головы до пят, которым можно управлять с помощью мысленных команд. По замыслу ученых, парализованному человеку останется только подумать о каком-либо действии, как это делает Джин, и «костюм» это действие выполнит. Для реализации замысла добровольцу планируется имплантировать пластины с высокой плотностью электродов в десять разных областей мозга — в дальнейшем это позволит пациентам канализировать свою мозговую активность, чтобы управлять сложнейшими роботами<sup>13</sup>.

Ученые из Института медицинских исследований имени Файнштейна в Нью-Йорке в 2016 году избрали несколько другой подход. Ученые перехватывали сигналы моторной коры, чтобы знать, когда она отдает команды мышцам, но информацию направляли не роборуке или костюму, а непосредственно мышцам через установленную на предплечье пациента систему электростимуляции<sup>14</sup>. Участник эксперимента думает о каком-либо движении руки, и сигналы (пропускаемые через алгоритм машинного обучения для наиболее точной интерпретации бури нейронной активности) обходят стороной поврежденный участок спинного мозга и пересекают на мышечный стимулятор. И рука выполняет движение. Парализованные испытуемые могли производить различные движения запястьем и кистью руки: брать предметы, поворачивать их в разные стороны и класть на место, а также двигать пальцами, что позволяло набирать номер на телефоне, использовать клавиатуру и т. п.

\*\*\*

Идея перенаправлять выходные нервные импульсы к роботизированной руке обладает одним недостатком: мозг не получает обратной сенсорной связи от пальцев. Рука-робот может слишком сильно сдавить яйцо или, наоборот, так слабо, что не удержит, а промашка будет осознана, только когда уже поздно ее исправлять. Так младенец может агучать в наушниках, не слыша, какие звуки производит.

---

\* Экзоскелет — устройство, предназначенное для восполнения утраченных функций, увеличения силы мышц человека и расширения амплитуды движений за счет внешнего каркаса и приводящих частей, а также для передачи нагрузки при переносе груза через внешний каркас в опорную площадку стопы экзоскелета. Прим. ред.

## Живой мозг

Для устранения данного недостатка следует замкнуть петлю обратной связи. Этого можно достичнуть переключением паттернов активности в соматосенсорную кору. Когда роборука прикасается к предмету, в соматосенсорные области направляется паттерн, эквивалентный прикосновению к кончикам пальцев, и тогда у человека возникает ощущение, что он прикасается к поверхности с конкретной текстурой. Прикосновение к другим предметам позволит ощутить уже другую текстуру. Таким образом человек получает ощущение сенсорного взаимодействия с миром. Его мозг благодаря своей гибкости со временем научится преобразовывать эту схему в полное восприятие роботизированной руки как собственной. Мозг успешнее всего обучается двигать телом при замкнутой петле обратной связи — не только за счет посылаемых сигналов, но и за счет принимаемых, которые подтверждают, что взаимодействие с миром происходит. Например, когда младенец бьет ручкой по деревянным планкам кроватки, он осознает их, видит и слышит звук удара.

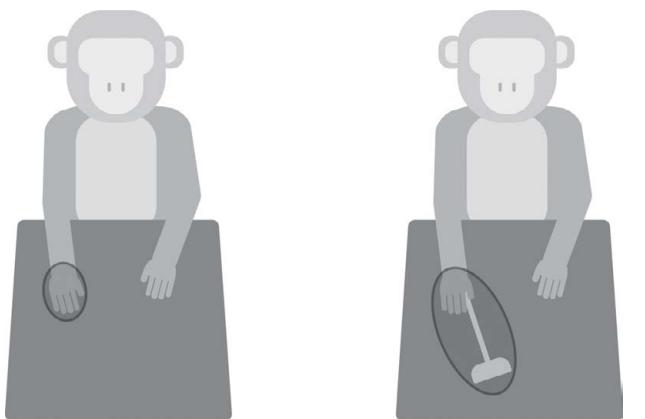


Рис. 5.11. Когда обезьяна использует лопатку, чтобы пододвинуть к себе предмет, до которого не может дотянуться, представительство тела в ее мозге видоизменяется, чтобы отобразить всю длину лопатки. Овалом показана область на карте тела, где под воздействием электродов возникает возбуждение нейронов

Поскольку обучение мозга в основном происходит в таком цикле, неудивительно, что моторная и сенсорная карты, как правило, изменяются параллельно. Например, когда условия эксперимента принуждают обезьян пододвигать к себе лакомство с помощью лопатки (длины руки для этого недостаточно), обе карты в их мозге слегка перестраиваются, чтобы растянуть представительство руки на длину инструмента.

Лопатка в буквальном смысле становится частью их тела (рис. 5.11)<sup>15</sup>. Моторная и сенсорная системы не являются независимыми, напротив, они соединены в непрерывном цикле обратной связи.

\*\*\*

Как мы видим, применение интерфейсов «мозг — компьютер» позволяет восстановить или заменить поврежденную конечность. Можно ли применить такую же технологию для создания дополнительной конечности?

В 2008 году самец обезьяны с двумя нормальными здоровыми руками силой мысли управлял действиями третьей, металлической руки. Имплантированная в его мозг миниатюрная плата с электродами позволяла ему двигать роботизированной рукой, чтобы хватать и отправлять в рот маршмеллоу<sup>16</sup>. Первоначально обезьяну тренировали выполнять нужное действие перемещением курсора на экране в сторону цели и каждую удавшуюся попытку поощряли лакомством. Сначала самец выполнял действие собственными руками. А потом случилось нечто весьма примечательное: в конце концов он перестал действовать рукой, а курсор продолжал двигаться сам собой. Мозг животного перемонтировал нейронную сеть, чтобы разделить эти две задачи: часть нейронов продолжала соответствовать его настоящим рукам, а другую часть мозг откомандировал курсору на экране. В конце концов сигналы мозга приспособились управлять роборукой и захватывать ею маршмеллоу, причем безо всяких физических движений настоящими живыми конечностями. Механическая рука стала еще одной конечностью (рис. 5.12).

Следует ли удивляться, что люди и обезьяны способны сообразить, как силой мысли управлять роботизированной рукой? Нет, не следует: за этим стоит тот же процесс, посредством которого ваш мозг в младенчестве учился управлять вашими «родными» конечностями из костей и плоти. Как мы уже видели, процесс состоял в том, чтобы вы хаотично двигали ручками-ножками, раскидывали их в стороны, пробовали кусать пальчики ног, хватались за планки кроватки, глазели по сторонам, переворачивались и поворачивались — годами! И все это ради того, чтобы тонко отрегулировать управление телом. Мозг рассыпал ему команды, сопоставлял их с получаемой от мира обратной связью и наконец усвоил, каковы возможности ваших конечностей. Ваша обтянутая кожей рука ничем не отличается в этом смысле от громоздкой серебристой роборуки, позволявшей обезьяне добывать себе маршмеллоу. По большому счету рука — это обычное эксплуатационное оборудование, и вы настолько к нему привычны, что даже не осознаёте всего его великолепия.

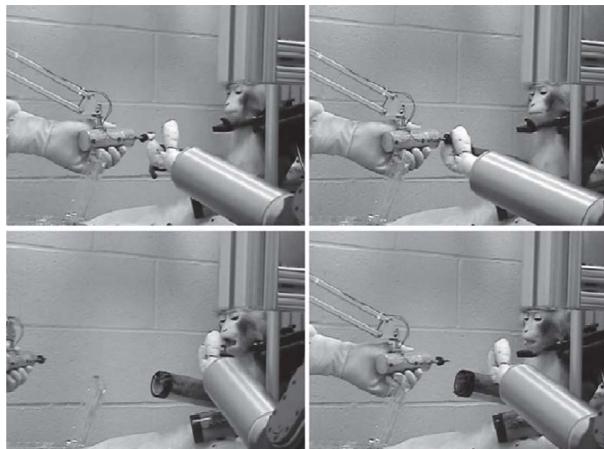


Рис. 5.12. Обезьяна посредством мозговой активности руководит действием роботизированной руки и отправляет в рот маршмеллоу

Мы предоставляем ученым возможность ломать голову, как сконструировать качественную роботизированную руку, однако обучение манипулировать ею мы почти целиком отдаем на откуп мозгу пользователя. А поскольку мы воспитывались без привычки к металлическим конечностям, нам не удастся интуитивно двигать тяжелой большую силу механической железкой. Нашему мозгу еще надо научиться управлять новообретенной рукой, как это сделала Джен. Так что пускай инженеры делают свою половину работы, а над второй все равно придется потрудиться нейронным зарослям в мозге пользователя.

Не правда ли, способ, каким обезьяна выучилась использовать роботизированную руку независимо от своих «родных» конечностей, вызывает в памяти образ дока Ока и то, как он орудовал своими робоконечностями, даже когда настоящие руки занимались вполне прозаическими делами (скажем, разливали по мензуркам химикаты или управляли машиной при бегстве). Мозг обезьяны со временем выделил для роборуки часть кортикальной территории, отдельную от той, которая отвечает за работу естественных конечностей. Лабораторная обезьяна сумела разделить ресурсы и распределить их между конечностями разного типа — собственными из плоти и крови и искусственной металлической.

\*\*\*

И у Джен, и у обезьян в экспериментах с маршмеллоу робоконечность подсоединялась не непосредственно к туловищу, а через пучок кабелей. Если бы нам удалось перейти на беспроводной формат, роборуке вовсе не

обязательно было бы находиться в одном с нами помещении. Возможно ли управлять роботом, который обитает на другом краю планеты? Еще как возможно! Более того, такое уже известно.

Несколько лет назад в Университете Дьюка нейробиолог Мигель Николелис с группой коллег имплантировали электроды в мозг макаки-резуса (это опять был самец), которая в реальном времени руководила походкой робота, находившегося в другой части света. Обезьяна ходила по беговому тренажеру, а сигналы с ее моторной коры записывались, кодировались в двоичный код и передавались через интернет-лаборатории в Японии, где их транслировали роботу. И полутораметровый робот весом 90 кг перемещался по лаборатории, в точности повторяя манеру ходьбы макаки, словно был ее металлическим двойником.

Как исследователи добились этого? Демонстрации предшествовали обучение макаки ходьбе на тренажере и интенсивные тренировки. Ученые записывали сигналы с датчиков, помещенных на лапы обезьяны, чтобы определить, как работают при ходьбе ее мышцы, а также фиксировали сигналы сотен нейронных клеток, чтобы понять, как их активность преобразуется в конкретные мышечные сокращения. Затем изменяли скорость ленты на тренажере и определяли корреляцию мозговой активности обезьяны с темпом ее ходьбы и длиной цикла шага.

Хотя ни один отдельный нейрон не мог дать исследователям полной информации, ученые заключили, что между нейронами в разных областях мозга существуют определенные временные взаимосвязи, и это позволило начать расшифровку закодированного в мозговых импульсах сложного взаимодействия групп мышц, заложенного в основе обманчиво сложного акта ходьбы<sup>17</sup>.

После основательной подготовительной работы ученые смогли приступить непосредственно к эксперименту: они записывали нейронные сигналы в мозге находившейся в Северной Каролине макаки и в реальном времени транслировали зашифрованные моторные команды расположенному в Киото роботу. За исключением незначительных задержек в обработке и трансляции сигналов, обезьяна и ее металлическая копия шагали вполне синхронно.

Когда сам принцип был наглядно продемонстрирован, исследователи в Дьюке выключили тренажер. Но обезьяна все еще видела своего аватара на экране и думала о ходьбе. А тем временем робот в Киото продолжал расхаживать по лаборатории, поскольку сигналы моторной коры макаки по-прежнему транслировались ему. Точно так же Джен мысленно представляла движения, а роборука выполняла их.

Представляется, что в не очень отдаленном будущем мы почти неизбежно получим управляемых силой мысли роботов на производстве, в подводной среде, а может, и на поверхности Луны и будем управлять ими, не покидая уютных насиженных диванов<sup>18</sup>. После основательных тренировок наши кортикальные карты включат в свой состав приводы и детекторы роботов, которые станут нашими телеконечностями и телесенсорами.

В ходе эволюции наши тела развивались на богатой кислородом поверхности Земли. Но использование пластичности мозга для построения тел на больших расстояниях внесет свои поправки в нашу главную стратегию освоения космического пространства.

## Мое подчиняется мне

Какими последствиями обернется расширение вашего тела — например за счет роборуки или стального аватара на другом конце города — для опыта вашего сознания? Ответ таков: вы будете воспринимать робота как часть себя. Искусственная рука станет для вас еще одной конечностью. Безусловно, необычной ввиду разделяющего вас физического расстояния, но, вопреки отдаленности, она все равно вправе считаться вашей. Единственная причина, по которой нам так привычны присоединенные к телу руки-ноги, в том, что Мать-природа — великая мастерица шивать живые ткани, к примеру мышцы, сухожилия и нервные волокна, но никогда не пробовала сотворить дистанционное управление конечностями через Bluetooth<sup>19</sup>.

Если дополнительные конечности или телеконечности кажутся вам экзотикой, спешу напомнить, что мы сталкиваемся с ними, можно сказать, каждый день. Посмотрите в зеркало и подвигайте рукой. Вы увидите ее как объект, расположенный на некотором отдалении от вас, который с отменной синхронностью двигается, подчиняясь командам вашей моторной коры. Хотя зеркальное отражение поначалу немного сбивает маленьких детей с толку, они вскоре начинают воспринимать его как самих себя. Ребенок не может напрямую испытывать сенсорные ощущения от своих отраженных в зеркале рук и ног, однако видит, что управляет ими. И этого достаточно, чтобы «я» ребенка присвоило себе их зеркальное отражение.

Аналогичное представление о себе имеют представители расы борг из «Звездного пути». Они ассилируют собственную уникальную идентичность всех встреченных — за исключением тех, кто

не поддается контролю, как возмутительно непредсказуемый капитан Пикар.

Взаимосвязь между осознанием себя и предсказуемостью позволяет раскрыть суть такого расстройства, как соматоагнозия, что переводится как «незнание собственного тела». При соматоагнозии из-за повреждения правой теменной (париетальной) доли мозга (скажем, из-за инсульта или опухоли) пациент больше не может управлять конечностью. В результате человек упорно отрицает, что это его конечность, а иногда и вовсе настаивает, что она принадлежит кому-то другому<sup>20</sup>. Он может приписать ее умершему другу, родственнику, призраку, дьяволу или кому-то из ухаживающего за ним медперсонала. А «родная» конечность, по уверениям пациента, украдена или ее вообще никогда не было. В одной из разновидностей заболевания пациент воспринимает ее как животное — например змею, — наделенное собственной жизненной силой и собственной волей.

Проявления этого расстройства бывают разнообразными и довольно странными: пациент может быть равнодушен к «уже не своей» конечности или, наоборот, с маниакальным упорством постоянно говорить о ней и придумывать нелепые объяснения ее происхождения («Мне ее пришил кто-то неизвестный»). Другие пациенты выказывают отвращение к конечности («Моя нога лежит мертвым грузом»). В более тяжелых проявлениях заболевания пациент проникается к отчужденной конечности ненавистью, всячески поносит ее и норовит нанести ей травму<sup>21</sup>.

Общепринятого стандартного объяснения данного расстройства не существует. Однако вы без труда угадаете мой вариант объяснения, если посмотрите на соматоагнозию через призму рассказанного в этой книге: мозг утрачивает способность управлять конечностью, и потому она выпадает из общины под названием «собственное «я»».

Иногда у пациентов наступает небольшое просветление, и они снова «узнают» свою конечность. Правда, длится это недолго. Согласно моей гипотезе такое возможно, если руке или ноге случается выполнить действие, совпадающее с намерением ее владельца. Предположим, он желает протянуть руку к шоколадному батончику на столе, отверженная рука случайно тянется в нужную сторону, и владелец приписывает ее действие своей воле. А поскольку человека на протяжении жизни сопровождает опыт контроля над собственными руками, даже единичный акт «подчинения» руки может вернуть ему чувство единения с ней, хотя бы и на мгновения.

Другого типа потерю идентичности случилось пережить в начале 1970-х годов неврологу, писателю и популяризатору медицины Оливеру

Саксу<sup>22</sup>. Во время турпохода по горам в Норвегии Сакс сильно испугал внезапно появившийся на тропе кабан-секач. Сакс в ужасе бросился бежать вниз по склону, в попыхах наткнулся на небольшой выступ скалы и порвал четырехглавую мышцу бедра. Он соорудил из зонтика подобие шины и продолжил спуск, еле ковыляя на «ни на что не годной» ноге, пока его не нашли и не доставили в больницу местные охотники на оленей. В больнице Сакс впал в состояние бреда и спутанного сознания. Из-за разрыва четырехглавой мышцы он не мог даже пошевелить ногой, и у него возникла полная уверенность, что это не его нога. В какой-то момент ему показалось, что он видит свою вытянутую ногу, но тут же обнаружил, что она свешивается с края кровати. Открытие напугало и встревожило Сакса:

«Я не знал этой ноги. Какая-то она была странная, не моя, не знакомая. Я вглядывался в нее, но совершенно не узнавал... Чем дольше я смотрел на этот длинный белый валик, тем более чужеродным и непостижимым он мне казался. Я больше не мог ощущать, что это мое, часть меня. Было стойкое ощущение, что она не имеет ко мне никакого отношения. Нечто абсолютно чужеродное — и тем не менее она с какой-то стати крепилась к моему телу и, что еще невыносимее, казалась моим продолжением. Не было и намека на чувствительность, и вообще она выглядела и ощущалась жутко, казалась необъяснимо чуждой мне — как пришпандоренный к моему телу безжизненный муляж».

Как мы истолкуем чувства, которые внушала Оливеру Саксу его нога? Вспомним расу борг и капитана Пикара: все, что поддается твоему контролю, становится твоим, а то, что контролировать не получается, не имеет к тебе отношения. Из-за невозможности заставить большую ногу подчиняться ему Сакс не ощущал, что она его продолжение. Напротив, в его представлении это было скопище миллиардов чужих ему клеток: чья-то кость, чья-то кожа и почему-то растущие из нее странные волоски. И мы бы точно так же воспринимали свое тело, если бы не могли управлять им и оно не посыпало бы нам никаких ощущений.

Кстати сказать, подозреваю, что это ощущение предсказуемости имеет отношение к феномену, когда человек, которого вы знаете вдоль и поперек, например близкий родственник, становится как бы частью вас самих. Разумеется, человек — существо слишком сложное, чтобы говорить о его полной предсказуемости, и то, насколько ваша половинка удивляет вас своими поступками, отражает, насколько она сохраняет независимость.

## Сам себе игрушка

Если вы захотите заиметь новое тело, ни протезы, ни хирургия вам не понадобятся. Развитие такого направления в робототехнике, как конструирование роботов-аватаров, позволит пользователю дистанционно управлять роботом, видеть все, что он видит, и чувствовать все, что чувствует он. Посмотрим, например, на Shadow Hand\*, одну из самых замысловатых среди созданных на данный момент антропоморфных искусственных рук. Подушечка каждого пальца оборудована сенсорами, которые посылают данные mechanoreцепторной перчатке, надетой на руку пользователя. Передавая информацию через интернет, вы можете из Кремниевой долины управлять такой рукой, находящейся в Лондоне<sup>23</sup>. Другие инженерно-конструкторские группы проектируют роботов-аватаров для аварийно-восстановительных и спасательных работ в местах землетрясений, пожаров или террористических атак, а люди-операторы будут управлять этими роботами из безопасных локаций. Правда, я еще не слышал, чтобы кто-то использовал аватара необычной формы, но определенно такая возможность есть: мозг способен освоить интерфейс аватара самых причудливых форм так же легко и просто, как осваивает лыжи, батут или ходули-кузнечики.

Хотя развитие робототехники позволит небольшой группе людей в реальности испробовать расширение тела или тело странных форм, эта затея ужасающе дорогостояща. Однако в нашем распоряжении есть более удобный способ примерять на себя разные формы тела, а именно в виртуальной реальности. Погрузившись в созданное техническими средствами пространство, вы сможете до неузнаваемости менять морфологию своего тела, причем мгновенно и без больших затрат.

Вообразите, что в вашей виртуальной реальности (VR-среде) вы смотритесь в зеркало. Поднимаете руку и видите, что ваш виртуальный аватар в зеркале делает то же самое. Сгибаете шею — аватар сгибает свою. Теперь представьте, что у него не ваше лицо, а лицо женщины-эфиопки или мужчины-норвежца, мальчишки-пакистанца или пожилой матроны-кореянки. И поскольку выше мы уже обсуждали, по какому принципу мозг определяет свою (вашу) индивидуальность («Если я могу этим управлять, значит, это я»), вам достаточно всего несколько минут покрутиться и покрасоваться перед зеркалом, и вы убедите себя, что теперь обладаете иным телом. Тогда вы сможете разгуливать по виртуальному

---

\* Разработана британской компанией Shadow Robot. Прим. ред.

миру как другой человек, переживая не собственный опыт, а опыт вашей изменившейся идентичности. Самоидентичности свойственна поразительная гибкость. В последние годы наука исследует вопрос, насколько у индивида может усилиться чувство эмпатии, когда он принимает облик другого человека<sup>24</sup>.

Впрочем, приобретение нового облика — только начало. В конце 1980-х годов сбой в машинном кодировании дал толчок к виртуально-реальному изучению тел необычных форм. Один ученый в рамках исследования заселился в аватар докера, и вдруг у аватара во много раз увеличилась рука (стала размером со строительный кран) — всего лишь потому, что программер по рассеянности ввел слишком много нулей в коэффициент масштабирования. К всеобщему удивлению, ученый не растерялся и быстро сообразил, как эффективно и точно действовать своей мегарукой<sup>25</sup>.

Казус побудил исследователей задуматься, в какие еще типы необычных тел можно заселяться в VR-среде. Пионеры виртуальной реальности Джарон Ланье и Энн Ласко предлагали пользователям попробовать обосноваться в телах восьминогих омаров. Две руки пользователя управляли первой парой ног омора, а программисты пробовали применить ряд сложных алгоритмов для управления остальными ногами. Оказалось, что контролировать все восемь ног непросто, однако некоторые пользователи в конце концов научились управляться с ними не хуже самих омаров. По этому случаю Ланье запустил в оборот термин «гомункулярная подвижность», желая подчеркнуть поразительную эластичность представительства тела в мозге.

Спустя несколько лет группа ученых Стэнфордского университета во главе с Джереми Бейленсоном приступила к более научному исследованию феномена гомункулярной подвижности. Они задались вопросом, смогут ли люди обучиться четко управлять третьей рукой в виртуальной реальности<sup>26</sup>. Когда вы надеваете VR-очки и берете в руки по контроллеру, то в виртуальном пространстве видите две свои руки, а также дополнительную третью: удобно расположенная посередине вашей виртуальной груди, она так и приглашает воспользоваться ею. Авторы эксперимента ставили перед испытуемыми простую задачу: дотрагиваться до коробки, как только она поменяет цвет. Но коробок было очень много, и, чтобы успевать вовремя коснуться каждой, требовалось задействовать все три руки. Если контроллеры в руках пользователя позволяли легко управлять двумя настоящими руками, то для управления третьей требовалось вращать запястьями. Испытуемые за три минуты обучились орудовать третьей рукой. Иными словами,

сумели приспособиться к новой схеме тела, показателем чего служило качество выполнения задачи.

Исследователей ожидает непочатый край разнообразных форм и конструкций телесности: представьте, например, что из вашего копчика произрастает виртуальный хвост и вы можете ловко управлять им движением бедер<sup>27</sup>. Или вообразите, что ваше тело размером с мячик для гольфа, или что оно величиной с многоэтажный дом, или что у вас по шесть пальцев на руках, или что вы обернулись комнатной мухой и трепещете крылышками. Или по примеру дока Ока превратились в осьминога.

Научившись сочетать гибкость мозга и нарождающуюся креативность дизайна виртуальных миров, мы прорвемся в новую эру, где наши виртуальные идентичности больше не будут ограничены телами, в которых мы развились по прихоти эволюции. Более того, в новой эре мы сможем даже пришпорить эволюцию — с бесконечных миллиардов лет до каких-то часов. Тела таких форм и размеров, о каких и помыслить не могла Матушка-природа, мы уже сейчас можем примерять на себя, превращая своих виртуальных аватаров в нейронально реальных.

Интересная возможность таится в гипотезе о том, что с изменением тела мозг тоже может претерпеть изменения. Одно исследование показало, что студенты колледжей, использующих аватары граждан старшего возраста (проще говоря, пенсионеров), более склонны помещать деньги на банковские сберегательные счета; мужчины, выбравшие женские аватары, больше заботятся о близких; некоторые пользователи при виде своих аватаров, выполняющих физические упражнения, проявляют больше желания последовать их примеру в реальной жизни<sup>28</sup>. (В мире фантастики подобная перемена тела, как предполагается, и послужила причиной злодейства дока Ока: идея состоит в том, что, получив в свое распоряжение четыре дополнительные конечности, его мозг изменил схему нейронной сети, из-за чего изменился образ мыслей дока<sup>29</sup>.) Иными словами, то, кто мы есть, определяется тем, как смонтирована в нашем мозге нейронная сеть. Подправив какую-нибудь мелочь в теле, мы рискуем изменить личность его обладателя.

Приведу пример из жизни. Литейщик Найджел Окленд в результате несчастного случая на производстве лишился руки до локтя. Несчастье сокрушило его физически и морально, но ему поставили великолепный бионический протез<sup>30</sup>. Мозг Найджела посыпает команды неповрежденным нервным волокнам и мышцам, сигналы интерпретируются бионической начинкой протеза, и он плавно двигается более чем в дюжине направлений. А фокус вот в чем: попросите Найджела повернуть запястье. Он поднимет руку и повернет ладонь, а она как миленькая продолжит

вращение, пока не повернется вокруг своей оси раз, другой, и так и будет медленно вращаться, словно волчок, пока Найджел не остановит ее. Стало быть, тело у Найджела лучше, чем у вас, в том смысле, что имеет меньше ограничений и больше степеней свободы движения. При конструировании роборуки биоинженеры сообразили, что нерентабельно снабжать ее связками и сухожилиями, ограничивающими диапазон движения живой кисти. Как предполагается, Найджел способен генерировать мысли, на которые не способны мы (скажем, «Пускай рука продолжает поворачиваться» или «Сейчас одним поворотом руки вкрутую лампочку»).

## Один мозг в бесконечном разнообразии строений тела

Как мы убедились на примере лучника Мэтта и собаки Фэйт, мозг принаршивается обеспечивать локомоцию того тела, которое ему случилось получить. И, как в случаях с роборукой Джен и хватающей маршмеллоу механической рукой обезьянки, мозг, стоит ему обнаружить новое оборудование, сообразит, как им оперировать. Смонтированные под сводами черепа нейронные сети проделывают подобные трюки на основе простого алгоритма: высылают моторные команды (отклонись влево!), оценивают обратную связь (скейтборд кренится, теряет устойчивость) и соответственно корректируют параметры действия, все больше и больше совершенствуя мастерство.

Сумеет ли мозг приспособиться к любому миру или любому строению тела? Через сколько-то сотен лет мы, должно быть, увидим, как младенцы рождаются где-нибудь на Луне или на Марсе. И расти они будут в пределах другой, не земной гравитации. В результате их тела, скорее всего, будут развиваться иначе, и для передвижения они, видимо, приспособят иные наборы расширений. В этом далеком будущем нейробиологи станут изучать проблемы развития новых тел и новых мозгов и задаваться вопросами, вырастут ли младенцы не такими, как земные, в плане памяти, познавательных способностей или осознанного опыта.

Подумайте, как изменится наша индустрия, когда мы изучим и освоим принципы нейронных связей. Представьте, какие преимущества мы получим, если у автопроизводителя появится возможность спроектировать один потенциально многоцелевой двигатель, который, будучи установленным на любое транспортное средство (газонокосилку, трицикл,

## Глава 5. Как раздобыть себе тело получше

грузовик, космический корабль), сам собой модифицируется под особенности конструкции, чтобы оптимально обеспечивать движение. А рынок послепродажного обслуживания и автозапчастей сможет добавить к вашему автомобилю любые новые компоненты — плавники, например, или телескопические ноги — без реконструкции самого автомобиля, потому что он сам сообразит, как ими пользоваться на ваше благо.

Мы вступаем в бионическую эру, когда люди получат в свое пользование оборудование мощнее и долговечнее, чем биологическое телоробот, предоставляемое нам при рождении. И когда через миллионы лет нас начнут изучать наши любознательные, неведомые нам потомки, они, возможно, назовут наше сегодня временем, когда человечество впервые сошло с медленных путей, коими влекла нас неспешная эволюция, и взяло в собственные руки будущее своих тел. Чем дальше, тем больше бионика будет становиться общественным достоянием. Когда у наших праправнуров будут отказывать ноги, они не станут покорно усаживаться в инвалидные кресла; если им ампутируют руки, эта беда не заставит их уповать на подаяние. Как бы не так! Они снабдят свои тела искусственными конечностями, зная, что их мозг прекрасно приспособится управлять новым оборудованием. Люди с парализованными ногами будут вовсю отплясывать в управляемых силой мысли экзоскелетных костюмах<sup>31</sup>.

Мало того, помимо восстановления утраченной функции наши потомки раздвинут свои моторные способности за пределы естественных биологических ограничений. В грядущие века история про дока Ока с его восемью конечностями покажется такой же безнадежной архаикой, какой сегодняшнему читателю представляются дерзкие по своим временам мечты Жюля Верна пересечь Атлантику всего за сутки. Тем, кто придет в этот мир после нас, не придется ограничивать себя пределами собственного тела; напротив, они смогут расширять свою телесность во Вселенной, вбирая в нее все, что окажется под их контролем.

# ГЛАВА 6

## ПОЧЕМУ ЗНАЧЕНИЕ ИМЕЕТ ЗНАЧЕНИЕ

У Ласло Полгара три дочери. При большой любви к шахматам и дочерям Ласло решился на небольшой эксперимент: не отправлять девочек в школу, а дать им домашнее образование. Школьные предметы они с женой преподавали сами, а помимо того со всей строгостью, методично и серьезно учили их играть в шахматы. Каждый день игры и забавы девочек были сосредоточены вокруг шахматных фигур и их приключений на шестидесяти четырех клетках — так мальчишки увлеченно играют в солдатики.

К 15 годам старшая дочь Полгаров Сьюзен (Жужи) вошла в когорту самых сильных шахматисток мира. В 1986 году она — первой среди женщин — прошла квалификацию для участия в чемпионате мира по шахматам среди мужчин, а спустя пять лет получила звание гроссмейстера — также среди мужчин.

В 1989 году, в разгар небывалого взлета шахматной карьеры Сьюзен Полгар, ее средняя сестра, 14-летняя София, прославилась «Разграблением Рима» — ошеломительной победой на шахматном турнире в Италии; ее игру считают одной из сильнейших среди всех, когда-либо продемонстрированных 14-летними шахматистами. Впоследствии София добавила к своим шахматным регалиям звания международного мастера и гроссмейстера среди женщин.

Младшая из сестер Полгар, Юдит, признана лучшей среди официально зарегистрированных женщин-шахматисток. Звание гроссмейстера она получила в нежном возрасте 15 лет и 4 месяца и единственная среди женщин включена в рейтинг-лист ФИДЕ — сотню сильнейших шахматистов мира. Некоторое время Юдит Полгар числилась и в топ-10 сильнейших шахматистов мира.

Что же помогло сестрам Полгар добиться таких выдающихся успехов?

Их родители придерживались следующей философии: гениями не рождаются, но гениев можно вырастить<sup>1</sup>. Дочерей тренировали ежедневно — и не только погрузили их в шахматную среду, но и сделали шахматы частью воспитания. Девочки получали похвалы, родительские объятия, внимание или же неодобрительный взгляд — смотря по тому, насколько успешной была их игра. В итоге мозг каждой из дочерей выстроил под эту логическую игру огромную нейронную сеть.

Мы уже убедились в способностях мозга реорганизоваться в ответ на входные данные, но суть в том, что не вся информация, проносящаяся по его проводящим путям, одинаково важна. Как и в какой мере мозг настраивается в ответ на входные сигналы, имеет самое прямое отношение к занятиям, которым вы себя посвящаете<sup>2</sup>. Если вы решили переключиться с нынешней профессии на орнитологию, больший объем ваших мозговых ресурсов мобилизуется на изучение орнитологических тонкостей (например, формы крыльев, окраса груди, размеров клюва), тогда как до этого нейронное представительство ваших знаний о птицах могло сводиться к самому примитивному (это птичка там, в небе, или самолетик?).

## Перлман или Ашкенази: где чья моторная кора?

О скрипаче Ицхаке Перлмане\* рассказывают такую историю. После одного из концертов восхищенный поклонник воскликнул: «Я бы отдал жизнь, чтобы так сыграть».

На что Перлман ответил: «Я и отдал»<sup>3</sup>.

Каждое утро Ицхак поднимается с постели в 05:15. После душа и завтрака он посвящает четыре с половиной часа утренней репетиции. Потом обедает, выполняет комплекс обязательных физических упражнений, за чем следует послеобеденная репетиция, тоже продолжительностью четыре с половиной часа. Такого распорядка Перлман неукоснительно придерживается круглый год, за исключением дней, когда выступает: в день концерта он репетирует только утром.

Схема нейронных связей со временем начинает отображать ваше занятие, и потому кора мозга у постоянно репетирующих музыкантов изменяется — до такой степени, что при нейровизуализации это заметно

\* Ицхак Перлман (р. 1945) — израильско-американский скрипач, дирижер и педагог, один из самых выдающихся скрипачей второй половины XX века. Прим. ред.

невооруженным глазом. Если всмотреться в участок моторной коры, отвечающий за движение рук, открывается нечто очень любопытное: у музыкантов на этом участке извилина образует складку, какой не бывает у немузыкантов, формой она напоминает греческую букву омега ( $\Omega$ )<sup>4</sup>. Тысячи часов практики физически изменяют мозг музыканта.

Реконфигурация мозга может рассказать и еще немало интересного.

И скрипач Ицхак Перлман, и пианист Владимир Ашkenази\* глубоко преданы своему искусству, оба бесчисленными часами оттачивают исполнительское мастерство, у обоих одинаково напряженный гастрольный график — и все же мозг каждого выглядит настолько специфически, что можно с первого взгляда определить, кому какой принадлежит. У музыкантов, играющих на струнных инструментах, омегаобразная складка извилины в моторной коре присутствует только в одном полушарии, поскольку у них виртуозно работают лишь пальцы левой руки, тогда как правая только водит смычком по струнам. В отличие от струнников, у пианистов омега присутствует в моторной коре обоих полушарий, потому что у них пальцы обеих рук вырисовывают на фортепианных клавишах сложнейшие узоры. Чтобы специалист определил, кто находится в сканере, достаточно одного взгляда на моторную кору (рис. 6.1).

Мало того, особенности реорганизации мозга могут рассказать и о других вещах: в коре находит отражение не только тот факт, что одна рука получает больше или меньше нагрузки, чем другая, — иногда можно определить, какое действие она выполняет. Предположим, вы работаете на сборочном конвейере и вам предписана одна из двух операций: заполнять баночки мелкими стеклянными шариками или закручивать у баночек крышки. Обе операции выполняются правой рукой, однако первая требует тонкой работы кончиками пальцев, тогда как вторая задействует запястье и предплечье. Если вы заполняете баночки, кортикальное представительство ваших пальцев расширяется за счет кортикальных территорий запястья и предплечья. Если же вы поставлены закручивать крышки, произойдет обратное<sup>5</sup>.

Подобным же образом раз за разом повторяемые действия получают отражение в структуре мозга, причем перемены не ограничиваются переделом территории моторной коры. Например, если вы несколько месяцев учите читать шрифт Брайля, разрастется участок, отвечающий за осязание указательного пальца<sup>6</sup>. Если во взрослом возрасте вы освоите

\* Владимир Ашkenази (р. 1937) — советский и исландский пианист и дирижер. Живет в Швейцарии. Семикратный лауреат премии «Грэмми». Прим. ред.

фокусы или жонглирование, в мозге увеличиваются области зрительной коры<sup>7</sup>. Отсюда следует, что мозг отражает не внешний мир вообще, а более конкретный его образ, то есть *ваш* внешний мир.



Рис. 6.1. Пианиста и скрипача легко различить, если сравнить участки их моторной коры

Данный принцип лежит в основе развития какого-либо навыка. Профессиональные теннисисты, например Серена и Винус Уильямс\*, посвящают тренировкам годы и годы, и потому правильное выполнение технических приемов у них доведено до автоматизма даже в разгар напряженного поединка: чек-степ, стоп-шаг, удар слева, удар справа, удар с лёта, смеш, подача с вращением, выход к сетке<sup>8</sup>. Они тренируются тысячи часов, чтобы правильные движения впечатывались в схему подсознательных нейронных связей; и если Серена станет играть осознанно, обдумывая движения, ей не видать победы как своих ушей. Теннисными успехами сестры Уильямс обязаны тому, что у обеих мозг действует как автомат, тонко и точно отлаженный неустанными тренировками.

Вы, вероятно, слышали о правиле десяти тысяч часов: предполагается, что именно столько времени требуется практиковать какой-либо вид деятельности, чтобы стать специалистом, — будь то серфинг,

\* Сестры Серена и Винус Уильямс (США) — одна из ведущих пар в женском теннисе начала XXI века. Прим. ред.

## Живой мозг

спелеология или игра на саксофоне. Хотя точно определить количество часов тренировки невозможно, в целом идея верна: только огромным числом повторений возможно проложить в мозге схему нужных навыков. Вспомните Дестина Сэндлина и его велосипед с обратным рулем. Хотя Дестин с самого начала понимал, как на нем ездить, для практического навыка этого не хватало, и потому ему пришлось неделями тренироваться. Аналогично обстояли дела у обезьян, которых учили пододвигать к себе пищу лопаткой: схемы их тел в мозге перестроились, чтобы включить в себя длину подсобного инструмента, в результате мозг стал воспринимать лопатку как элемент строения тела<sup>9</sup> (см. главу 5). Но такая перестройка происходила в мозге животных, только когда они активно пользовались лопаткой. Мозгу требуются многократно повторяемые действия с инструментом, просто держать его в руке недостаточно. Из этого принципа и проистекает правило десяти тысяч часов.

Интенсивная практика влияет на нейронные связи не только в моторных реакциях, скажем при игре на скрипке, ударах теннисной ракеткой или манипуляциях лопаткой. То же можно сказать и о поглощении информации. Когда студенты-медики готовятся к итоговому экзамену за триместр, объем серого мозгового вещества у них настолько изменяется, что на сканах мозга это можно увидеть невооруженным глазом<sup>10</sup>. Аналогичные перемены происходят, если взрослый человек обучается читать задом наперед в зеркале<sup>11</sup>. У лондонских таксистов области мозга, задействованные в пространственной ориентации, зримо отличаются от аналогичных у остального населения. В каждом полушарии таксиста увеличена область гиппокампа, которая участвует в формировании внутренних карт внешнего мира<sup>12</sup>. Словом, какому занятию вы посвящаете свое время, то и вносит свои коррективы в ваш мозг. В этом смысле вы больше того, что едите\*, — вы становитесь информацией, которую усваиваете.

Именно так сестры Полгар сумели подняться к вершинам мирового шахматного мастерства. Своими феноменальными достижениями они обязаны не особому гену, кодирующему шахматные таланты, а непрерывной многолетней практике, которая высекала в их мозге особые проводящие пути, кодирующие тактические и стратегические комбинации, а также возможности шахматных фигур, будь то конь, ладья, слон, пешка, король или ферзь.

И мозг стал отражать их мир. Но как?

---

\* Перефразированное выражение Людвига Фейербаха «Человек есть то, что он ест». Прим. ред.

## Формируем ландшафт

Видел недавно забавный интернет-мем. На картинке человеческий мозг говорит своему хозяину: «Слышишь, сдается, у тебя в кармане только что прожужжал мобильник». А внизу еще одна подпись: «Шутка, мобильник-то и не в кармане вовсе!»

Фантомные вибрации мобильного телефона — напасть исключительного XXI века. Подобный фантом порождают мимолетная судорога, непривычное подергивание кожи, подрагивания, тряска или прикосновение к ноге. И если частота и продолжительность этого ощущения хотя бы отдаленно напоминают вибрации мобильника, ваш мозг услужливо решит за вас, что вам поступило интересное сообщение. Лет тридцать назад, если бы у вас дрогнуло в ноге, вы решили бы, что причиной тому муха, или складка ткани, или кто-то случайно задел вас, неловко прошмыгнув мимо.

Почему интерпретация меняется от поколения к поколению? Потому что вибрация мобильника служит оптимальным объяснением для целого ряда ощущений.

Мы лучше поймем, что при этом происходит в мозге, если представим себе холмистый ландшафт. Капельке дождя, чтобы оказаться в озере, необязательно метить непосредственно в водоем, достаточно попасть на его берег, и неважно, на северный склон или южный, западный или восточный, — она все равно стечет в озеро. Аналогичным образом ощущению на коже бедра тоже необязательно быть результатом вибрации мобильника — причиной может служить легкое трение джинсовой ткани, непривычное сокращение мышц, зуд на коже или задетый подлокотник дивана. Но поскольку ощущение сходное, его сигналы, как капли дождя, скатываются к своему завершению: «Важное сообщение, прочитать немедленно». Облик вашего мозгового ландшафта формируется исходя из того, что значимо в вашем мире.

Задумаемся, как мы интерпретируем звуки речи. Для вас естественно понимать звуки и слова родного языка, тогда как в иностранной речи нередко присутствуют похожие звуки, но вот досада: их никак не удается отличить от знакомых вам. Но почему? Как выясняется, причиной тому служат некоторые различия в мозге людей, говорящих на разных языках. Но они не с рождения получили такие «особенные» мозги, как, собственно, и вы свои.

Если рассмотреть весь диапазон звуков, которые способны произносить люди, получится относительно плавный континуум. Несмотря на это, вы осваиваете речь, опираясь на накопленный опыт: конкретные

звуки означают одно и то же независимо от того, кто их произносит — ваш отец, няня или учитель. Ваш мозг догадывается, что протяженное [ееее] или отрывистое [е] все равно относятся к категории буквы Е. То же можно сказать о тягучем [аеее] в устах вашего приятеля-техасца или скопом [оу] в речи вашего друга-австралийца. Опыт учит вас, что эти двое имеют в виду один и тот же звук, разве что произносят его по-разному, и в конце концов все эти звуки скатываются к одной интерпретации в ландшафте ваших нейронных сетей.

В соседних долинах в свои «озера» собираются звуки, эквивалентные букве А, или И, или О и другим, и со временем ваш ландшафт начинает отличаться от ландшафта в мозге человека, который вырос в другой языковой среде и иначе различает звуки в сплошном звуковом континууме.

Для примера сравним младенца, родившегося в Японии (назовем его Хаято), и младенца из Америки (пусть он зовется Уильям). С точки зрения мозга никакой разницы между малышами нет. Но в родной Осаке младенец Хаято с первого дня жизни слышит вокруг себя японскую речь. А младенец Уильям в своем Пало-Альто слышит звуки английской речи, где тот же смысл обозначается уже другими звуками. В качестве примера разницы в восприятии звуков у двух малышей рассмотрим звуки [л] и [р]. В английском языке эти звуки информативны, так как меняют смысл слова, — сравните right и light (правый и свет) или raw и law (ссадина и закон). А в японском такого различия между [р] и [л] нет. В результате внутренний ландшафт Уильяма образует горный хребет между «озерами» интерпретаций этих звуков, чтобы разница между ними четко воспринималась на слух. А в мозге Хаято образуется одна общая долина, куда стекают и где интерпретируются оба звука. В итоге Хаято не воспринимает на слух разницы в звуках [л] и [р]<sup>13</sup>.

Очевидно, что мозг ребенка не рождается сразу с тем или иным нейронным ландшафтом: переселись беременная мать Уильяма в Осаку, а беременная мама Хаято в Пало-Альто, мальчишки без труда научились бы бегло говорить и понимать беглую речь на своем новом языке. В отличие от генетически заложенных особенностей, нейронные ландшафты Хаято и Уильяма сформировались бы под влиянием всего значимого, полезного и пригодного в их непосредственной среде.

Заметим, что внутренний ландшафт складывается довольно рано, еще до того как Хаято и Уильям научатся говорить. В подтверждение достаточно понаблюдать, как изменится поведение младенца во время грудного кормления, когда он услышит внезапную смену звуков. Например, можно произнести длинное [р], а потом внезапно сменить его

на длинное [л]: [рррррллллл]. Выясняется, что младенец начинает бодрее сосать материнскую грудь, когда замечает изменение звука, так что в шестимесячном возрасте и Хаято, и Уильям станут утолять голод быстрее, когда раскатистое [р] сменится мягким [л]. Однако к году Хаято перестанет различать эти два звука, они будут звучать для него одинаково и скатываться в одну и ту же долину интерпретации. Мозг Хаято утратит способность различать их, тогда как мозг Уильяма, пассивно слышавшего десятки тысяч английских слов, произносимых родителями, усвоит, что в различии звуков [р] и [л] заложен смысл. Тем временем мозг Хаято разовьет навык улавливать тонкие различия в других звуках, которые для мозга Уильяма будут неразличимы. Таким образом универсальная при рождении слуховая система постепенно выстраивает свои нейронные связи, чтобы наиболее четко различать уникальные для вашего языка звуки в зависимости от того, где вам случилось появиться на свет.

Таким же образом вы не с рождения умеете опознавать вибрации мобильника; наоборот, это его чрезвычайная значимость в вашей реальности выстроила ваш нейронный ландшафт таким образом, что для сходных ощущений образовался обширный общий резервуар-уловитель. Подобно Хаято, слышавшему звуки [р] и [л], вы сливаете в одну общую толковательную категорию мимолетные подергивания, вибрации и легкий зуд кожи в районе бедра.

Из всего того, что мы только что узнали, напрашивается вывод: многократно повторяемая практика или воздействие определенной среды и есть то главное, что монтирует схему нейронных связей мозга. Но, в сущности, здесь действует более глубинный принцип.

## Упорство

— Сколько психиатров потребуется, чтобы заменить электрическую лампочку?

— Всего один. Но лампочка сама должна захотеть поменяться.

Вернемся к Фэйт, удивительной двулапой собаке, с которой мы познакомились в главе 5. Тогда я преподнес ее историю так, будто ее мозг волшебным образом осознал, какого необычного строения тело ему досталось. Но сейчас мы копнем поглубже и доберемся до косточки, которая тут зарыта. Было ли в Фэйт что-то особенное? Сможет ли любая собака

освоить bipedальную локомоцию? А если да, то отчего все собаки не передвигаются на задних лапах?

Главная причина, по которой перестроились нейронные карты Фэйт, — их крайняя важность в контексте ее образа жизни. Фэйт требовалось добираться до пищи. Но по-другому, не как ее четвероногие собратья, доставочный дрон или курьер сервиса доставки еды DoorDash. Судьба вынудила Фэйт искать инновационное решение. Ее мозг испробовал разные стратегии, пока не наткнулся на ту, что оказалась единственной: удерживая равновесие на двух лапах, шагок за шагком ковылять в сторону кормушки. Так Фэйт могла достичь своей цели и через какое-то время вполне неплохо освоила двулапый способ передвижения. Не найдя его, бедняжка просто померла бы с голоду. Воля к жизни позволила гибкой нейронной сети в мозге Фэйт перебрать немалое количество вариантов и в конце концов решить проблему, что обеспечило ей пропитание, кров и заботу любящих хозяев.

Решающую роль в том, когда и как будет трансформироваться мозг, играют цели, к которым он стремится. Для сестер Полгар, Ицхака Перлмана, Владимира Ашkenази достижение вершин мастерства в избранной области зависело от их желания покорить эти вершины. Предположим, что у сестер Серены и Винус Уильямс есть брат Фред, не менее спортивно одаренный, чем они, и что родители еще в детстве дали ему в руки теннисную ракетку и годами заставляли упорно тренироваться. Фред добросовестно упражнялся, но сам теннис был ему отвратителен. Он никогда не получал от одноклассников ни слова одобрения, ни разу не выиграл ни одного соревнования, и дома, в семье, никто и никогда не баловал его похвалами. И какой результат дали бы его тренировки? Нулевой. В мозге Фреда также не произошло бы никакой заметной реорганизации. Даже если бы его тело технично выполняло все положенные движения, теннис все равно никак не согласовывался бы с его внутренними стимулами.

Это легко продемонстрировать в лабораторных условиях. Представим себе такой эксперимент: первый участник отбивает азбукой Морзе послание на вашей ступне, в то время как другой участник, совершенно независимо от первого, проигрывает вам некий музыкальный фрагмент. Если вы знаете, что за расшифровку послания вам полагается денежная премия, области вашего мозга, отвечающие за осознание в ступне (в соматосенсорной коре), начнут повышать чувствительность восприятия тактильных сигналов. Между тем вовлеченные в слух области мозга (слуховая кора) никаких изменений не покажут, хотя их тоже стимулируют. Теперь предположим, что вам поставлена противоположная

задача: денег вам дадут, если вы верно укажете тонкие различия в звуках мелодии, которую вам проигрывает второй участник эксперимента, а за расшифровку тактильного послания премии не причитается. В этом случае мы увидим, что ваша слуховая кора настраивается тоньше различать звуки, а в соматосенсорной коре никакой подстройки не происходит<sup>14</sup>. И хотя в обоих случаях мозг получает из внешней среды одни и те же стимулы, перемены в нем будут определяться задачей, за решение которой обещано вознаграждение.

По этой причине гипотетическому Фреду Уильямсу не светят успехи на корте: мозг не получает за них вознаграждения. Нейронные карты в его мозге, как и ваши в вашем, отражают стратегий, получившие положительную обратную связь.

Данные представления открывают новые пути восстановления мозга после повреждений. Представим, что у вашей подруги случился инсульт, повредивший участок моторной коры, и в результате одна рука у нее почти парализована. После многих безуспешных попыток использовать ее она отчаявается и в повседневной жизни начинает пользоваться только здоровой рукой. Это типичный сценарий, но в результате и без того слабо действующая рука все больше слабеет.

Уроки нейронных связей подсказывают метод лечения, на первый взгляд противоречащий логике, — индуцированная ограничением двигательная терапия: пациентке пристегивают к туловищу здоровую руку, чтобы ею нельзя было пользоваться. В результате женщине приходится все обиходные дела выполнять ослабленной рукой. Этот простой метод позволяет снова натренировать моторную кору: поврежденная рука вынуждена действовать и плюс к тому остроумно использует силу нейронных механизмов, заложенных в основе желания и вознаграждения. Тем более что у пациентки сильна внутренняя мотивация донести бутерброд до рта, открыть ключом входную дверь, поднести мобильник к уху и выполнять все прочие действия, обеспечивающие ей достойную самостоятельную жизнь. Хотя такая терапия на первых порах приводит пациента в отчаяние, она зарекомендовала себя как наиболее эффективный способ лечения, поскольку принуждает мозг пробовать новые методы и стратегии, а вознаграждение позволяет закреплять наиболее действенные из них.

Помните обезьян из Сильвер-Спринг, у которых изменились карты тела? Как выясняется, идея индуцированной ограничением терапии берет начало в тех давних исследованиях. У всех обезьянок были повреждены нервные волокна кисти одной руки, и Эдвард Тауб задался вопросом, перестали ли его подопытные использовать поврежденную руку просто

потому, что здоровой было лучше и удобнее выполнять экспериментальные задачи. Чтобы проверить, так ли это, Тауб помещал здоровую руку каждой обезьяны на перевязь, чтобы она не могла ею пользоваться. Это ставило зверьков перед трудной задачей: на одной руке повреждены нервы, а другую, здоровую, использовать нет возможности. Если животное испытывало голод, выход был один: пустить в ход больную руку, что обезьянки и делали. Как ни парадоксально, но, чтобы преодолеть недуг, пришлось доставить обезьянам еще больший дискомфорт, но именно это и помогло решить проблему<sup>15</sup>.

Теперь вернемся к Фэйт. Способны ли собаки передвигаться на задних лапах? Конечно. Однако у большинства псов нет ни желания, ни мотивации попробовать передвигаться бипедальным способом и явно нет резона осваивать его. В этом и состоит причина, почему прославилась Фэйт: не потому, что она единственная среди собачьего племени могла бы передвигаться на задних лапах, а потому, что единственная на практике доказала это. Аналогичная ситуация, когда незрячий человек использует эхолокацию. Как выясняется, люди с отменным зрением тоже способны освоить этот метод<sup>16</sup>, просто у большинства зрячих недостаточно мотивации, чтобы затрачивать многие часы на реорганизацию своих нейронных полей.

\*\*\*

Вознаграждение — мощный стимул, запускающий перестройку нейронной сети, но, что еще лучше, для каждой новой подстройки вашему мозгу не требуется ни лакомств, ни денег. В общем случае модификации в нейроцепочках инициируются чем-то соответствующим вашим целям. Если вы живете на Крайнем Севере и вам нужны данные о зимней рыбалке и характеристиках разных типов льда, именно эта информация закодируется в вашем мозге. И наоборот: если вы обитаете в районе экватора, вам необходимо знать, как выглядят ядовитые змеи и какие грибы пригодны в пищу; соответственно, ваш мозг отведет ресурс под эти знания. Ориентируясь на релевантность, как на путеводную звезду, мозг покладисто выбирает из массы деталей важные. Миллиарды нейронов образуют колоссальное полотно и, вышивая на нем образ мира, в котором нам случилось жить, мы развиваем умения в любом деле, соответствующем нашим потребностям, будь то баскетбол, театральное искусство, бадминтон, древнегреческая литература, прыжки в воду с экстремальной высоты, видеоигры, народные танцы или виноделие. Если задача в какой-то степени согласуется с более широкими целями, она найдет отражение в схеме нашей нейронной сети.

В качестве аналогии вспомните, что правительства практикуют непрерывную реорганизацию. В ответ на террористические атаки 11 сентября 2001 года изменения в свою структуру внесло правительство Соединенных Штатов: было создано Министерство внутренней безопасности, которое включило в себя и реорганизовало 22 существовавших на тот момент правительственныйх агентства безопасности. Точно так же тлеющие угли холодной войны вызвали в 1947 году крупные структурные изменения, в частности способствовали созданию Центрального разведывательного управления. Что уж говорить о тысячах менее существенных поправок, посредством которых правительство подстраивается под текущие цели государства и события во внешнем мире. Бюджеты то раздуваются, то съеживаются в зависимости от смены приоритетов. Когда над страной нависает внешняя угроза, разрастаются военные бюджеты, а в мирное время больше средств направляется на социальные цели. Как и мозг, государство реагирует на изменившуюся обстановку, маневрируя своими ресурсами и структурными реорганизациями, чтобы во всеоружии встретить очередной вызов.

## Согласие на передел территории

Как мозг узнаёт, что произошло нечто важное и ему требуется соответствующим образом изменить схемы нейронных связей?

Одна из его стратегий — задействовать свою пластичность, когда события во внешнем мире связаны между собой. Иными словами, кодировать только те события или явления, которые случаются одновременно (например, вид коровы сопровождается звуком мычания). По этой логике связанные друг с другом события в мозговой ткани тоже соединяются. Важно здесь то, что необходимые перемены происходят замедленно, поскольку иногда два события случайно совпадают во времени, образуя ложную связь (например, если вы при виде коровы вдруг услышали собачий лай). Для мозга было бы неразумно постоянно хранить все случайные совпадения, отсюда и его решение вносить изменения не спеша, по чуть-чуть зараз. Это позволяет ему кодировать только те явления (события), которые обычно совпадают. На фоне общего шума реальные совпадения выделяются тем, что раз за разом происходят в один и тот же момент.

И все же, несмотря на всю мудрость медленных поступательных перемен, операционное меню мозга не ограничивается лишь извлечением

закономерностей. Рассмотрим обучение с одного раза: скажем, вы дотронулись до раскаленной плиты и сразу же уяснили, что больше так делать не надо. Экстренное обучение служит гарантией того, что мы накрепко запомним события, угрожавшие нашей жизни или нашим конечностям. Но за подобным обучением стоят и другие причины. Вспомните, как в детстве вы узнавали новые слова (например, тетя объясняла вам: «Этот фрукт называется гранат»). Вам не требовалось усваивать данное слово в экстремальных условиях, как и вашей тете не было нужды неоднократно повторять, что оно обозначает. Она спокойно и всего один раз произнесла его, а вы сразу же запомнили. Почему? Потому что в вашем представлении это была особенная ситуация. Вы любили тетю, к тому же узнанное от нее слово несло вам социальную пользу: вы узнали, как называется этот фрукт, и теперь могли попросить дать вам его. Данный урок вы усвоили с одного раза не потому, что вам грозила опасность, а в силу его актуальности.

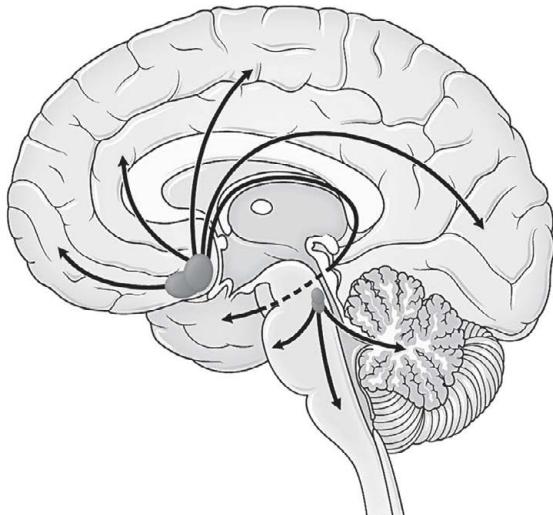
Внутри мозга актуальность выражается через действие систем, которые выделяют химические вещества, называемые нейромодуляторами<sup>17</sup>. Эти вещества позволяют переменам происходить только в конкретных местах и в конкретное время, а не повсеместно и одномоментно<sup>18</sup>. Наибольшую значимость среди таких химических веществ имеет ацетилхолин\*. Высвобождающие это вещество нейроны активируются под действием как вознаграждения, так и наказания. Они активны, когда животное изучает задачу и хочет что-то изменить, но инертны, когда задача прочно освоена<sup>19</sup>.

Наличие ацетилхолина в определенной области мозга повелевает ей измениться, но каким образом — не уточняет. Иными словами, когда холинергические нейроны (те, что высвобождают ацетилхолин) активны, они просто повышают пластичность целевой области мозга. В противном случае пластичность соответствующей области мала или вообще отсутствует<sup>20</sup> (рис. 6.2).

Приведу пример. Допустим, я сыграл для вас на пианино ноту, скажем фа-диез. Она вызывает активность в вашей слуховой коре, но площадь участка, отведенного под нее, не меняется, потому что этот звук не означает для вас ничего примечательного. Теперь допустим, что каждый раз, нажимая на эту клавишу, я угощаю вас шоколадным печеньем. В этом случае звучание ноты приобретает смысл, соответственно,

\* Ацетилхолин — органическое соединение, нейромедиатор, осуществляющий нервно-мышечную передачу, а также основной нейромодулятор в центральной нервной системе. Играет важнейшую роль в таких процессах, как память и обучение. Прим. ред.

предоставляемая ей территория расширяется. Ваш мозг выделяет больше места на эту частоту, поскольку получаемое вознаграждение указывает ему, что нота фа-диез чем-то важна для вас.



*Рис. 6.2. У ацетилхолина широкая зона проникновения, но он, как правило, высвобождается на очень специфических участках. Это позволяет перемонтировать нейронную сеть только в конкретных областях, не затрагивая другие*

Теперь предположим, что у меня нет печенья. Вместо того чтобы выдавать вам угощение, я нажимаю клавишу фа-диез и в тот же момент стимулирую в вашем мозге нейроны, высвобождающие ацетилхолин. Кортикальное представительство ноты расширяется в точности так же, как если бы я поощрил вас печеньем<sup>21</sup>. Ваш мозг выделяет под эту ноту большую площадь, поскольку наличие ацетилхолина указывает на ее значимость для вас.

Ацетилхолин может выделяться в мозге повсеместно и в результате давать толчок к переменам под действием любого релевантного стимула, будь то музыкальная нота, фактура поверхности или словесное одобрение. Таков универсальный способ сообщить мозгу: эта штука важна — давай-ка настраивайся лучше распознавать ее<sup>22</sup>. Ацетилхолин помечает релевантность расширением кортикальной территории. А любое ее изменение отражает степень эффективности вашего действия. Сначала ученые показали это на крысах. Две группы крыс обучали выполнять сложный трюк: выхватывать из высоко расположенной узкой щели сахарные шарики. Одной группе медикаментозно блокировали

высвобождение ацетилхолина. По прошествии двух недель вторая группа животных научилась быстрее и сноровистее добывать лакомство, и, соответственно, у них намного увеличилась область мозга, отвечающая за движения передних лап. У крыс, на которых ацетилхолин не воздействовал, размеры данной области не изменились, как не улучшился и навык — сахарные шарики они вытаскивали ничуть не быстрее и не точнее, чем в начале обучения<sup>23</sup>. Очевидно, что одними повторами трудного упражнения поведенческих улучшений не добиться, для этого необходимо также, чтобы нейромодуляторные системы закодировали его релевантность. Без ацетилхолина ваши десять тысяч часов практики — впустую потраченное время.

Вспомните Фреда Уильямса, который (в отличие от Серены и Винус) терпеть не мог теннис. Почему его мозг не соизволил поменяться, хотя парень тренировался по столько же часов, что и его сестры? А потому, что его нейромодуляторные системы не вовлекались в процесс тренировок. Сколько ни усердствовал он в тренировках бэкхенда\*, ни лупил ракеткой по мячу, все без толку — как у крыс, которые две недели подряд вытаскивали сахарные шарики из щели, но не испытывали воздействия ацетилхолина.

Холинергические нейроны широко распространены. Почему при их активации пластичность не включается повсеместно и изменения происходят не всегда? Дело в том, что высвобождение и влияние нейромедиатора ацетилхолина — а в рамках центральной нервной системы он является также и нейромодулятором — регулируются другими нейромодуляторами, которые задают переменам направление, кодируя стимул либо как вознаграждение, либо как наказание. Мировое научное сообщество все еще бьется над расшифровкой сложной хореографии нейромодуляторных систем, но нам уже известно, что и нейромедиаторы, и нейромодуляторы, вместе взятые, позволяют мозгу изменяться в одних областях, но блокируют изменения в других.

\*\*\*

Лондонские таксисты славятся тем, что назубок знают расположение всех улиц города. Даётся это многомесячными тренировками. Как я уже упоминал, в итоге у таксистов физически меняется структура мозга. Причина их феноменальной способности к запоминанию кроется в ценности запоминаемого: карта городских улиц позволяет таксисту

---

\* Бэкхенд — удар по мячу, когда он летит с неудобной для игрока стороны: для правши с левой, для левши с правой. Прим. ред.

заниматься выбранным делом и обеспечивать достаток семье, платить за ипотеку и образование детей, копить на будущую свадьбу или на грядущий развод.

Но вот что интересно: с тех пор как ученые в 2000 году впервые опубликовали результаты исследования лондонских таксистов, необходимость запоминать карты сильно уменьшилась. Сегодня проще положиться на Google, который, уж наверное, помнит все улицы Лондона, а если в целом — то все улицы всех городов планеты.

Выясняется, что для нынешних алгоритмов искусственного интеллекта (ИИ) релевантность вообще роли не играет: они запоминают все, что нам угодно. Это очень полезное свойство ИИ, но также причина, почему ему далековато до человекоподобия. Искусственный интеллект вообще не заботит, интересная ли проблема, уместная ли и нужная, — какую информацию ему загружают, ту он и запоминает. Какую задачу перед ИИ ни поставь (различать лошадей и зебр на миллиарде фотографий или отслеживать данные о рейсах во всех аэропортах планеты), у него отсутствует ощущение значимости, задача понятна ему только в одном смысле — статистическом. Современные ИИ никогда сами по себе не смогут решить, что данная скульптура Микеланджело невыразимо прекрасна или что у прокисшего чая омерзительный вкус, — или, скажем, возбудиться в ответ на сигналы готовности самки к спариванию. ИИ под силу спрессовать десять тысяч часов интенсивной практики в десяток тысяч наносекунд, но в итоге он не начнет больше благоволить одним последовательностям единиц и нулей, чем другим. Таким образом, ИИ в состоянии выполнять масштабнейшие задачи, но совершенно не способен стать хоть отдаленным подобием человека.

## С малолетства цифровой мозг

Каково значение модифицируемости мозга и его взаимоотношений с релевантностью для обучения нашей молодежи? Традиционное школьное обучение предполагает, что учитель привычно бубнит заученный материал или зачитывает помещенный на слайдах нумерованный список тезисов. Для перемен в мозге подобный подход неоптimalен, поскольку не вызывает у учеников искры интереса, а в таком случае пластичность мозга проявляется совсем слабо или вообще отсутствует. Информация не цепляет и не закрепляется в мозге.

Кстати, за много поколений до нас древние греки знали это. Они не владели приемами современных нейронаук, зато были наблюдательными,

что и позволило им выделить несколько уровней обучения. Высший уровень — когда обучение дает наилучший результат — достигается, когда учеником движут желание учиться, любознательность и глубокий интерес к предмету. С высоты современных познаний мы сформулировали бы это так: чтобы произошли изменения в нервных цепочках, требуется конкретное сочетание нейромедиаторов, связанное с желанием приложить усилия, любознательностью и заинтересованностью предметом.

Некоторые традиционные формы обучения строятся именно на этом принципе: разжечь в учащихся пламя любознательности. Например, в иешивах — высших религиозных учебных заведениях в иудаизме — изучение Талмуда построено так: учащиеся разбиваются на пары и задают друг другу порожденные любознательностью вопросы: «Почему здесь использовано именно это слово, а не другое?», «Почему эти два автора расходятся в своей оценке?». Весь материал подается в виде вопросов, что побуждает спарринг-партнера по обучению не механически запоминать информацию, а стараться понять ее суть. Хотя это старинная форма обучения, недавно мне в интернете попался сайт, где ставятся именно такие, «талмудические» вопросы в области микробиологии: «Если споры настолько эффективны для обеспечения выживания бактерий, почему не все биологические виды производят споры?», «Достоверно ли известно, что клеточные формы жизни подразделяются всего на три домена (бактерии, археи и эукариоты)?», «Почему пептиды, полученные ферментативным путем, не связываются друг с другом, чтобы образовать белок приличного размера?». На сайте сотни таких вопросов, они пробуждают интерес, вовлекают в обсуждение, заставляют задуматься, а не просто читать ответы из предложенного списка. Если рассматривать проблему в целом, то именно поэтому всегда полезно присоединяться к учебной группе, кружку или семинару: каков бы ни был предмет изучения — дифференциальное исчисление или история, — в мозге активируются социальные механизмы мотивации.

В 1980-е годы Айзек Азимов\* дал интервью тележурналисту Биллу Мойерсу. Азимов ясно видел и четко формулировал, в чем ограничивает учащихся традиционная образовательная система:

«Сегодня то, что принято называть образованием, вам навязывают. Всех школьников принуждают заучивать одно и то же, в один и тот же день и с одной и той же скоростью. Но дети разные. Для

---

\* Айзек Азимов (1920–1992) — американский писатель-фантаст, популяризатор науки, биохимик. Прим. ред.

одних темпы обучения слишком быстры, для других — слишком медленны, а для третьих само обучение идет не в ту сторону, в какую им нужно»<sup>24</sup>.

Азимов был сторонником индивидуализированного обучения. И хотя он не мог предвидеть подробности, зато прозорливо предсказал появление интернета:

«Дайте каждому шанс с самого начала следовать своему влечению, отыскивать то, что ему интересно, рассматривая все это прямо у себя дома, в своем темпе и в удобное для него время, — и тогда все полюбят учиться».

Именно с целью разжечь искру интереса крупные филантропы, например Билл и Мелинда Гейтс, ставят целью внедрение адаптивного обучения. Идея в том, чтобы задействовать возможности обучающих программ, которые быстро определяют уровень знаний каждого учащегося и выстраивают индивидуальный порядок, ритм и наполнение обучения исходя из его конкретных потребностей. Такой подход позволяет установить для каждого свой темп обучения, взаимодействовать с ним на его уровне и предлагать для изучения материал, который будет увлекать его и поддерживать в нем интерес к учебе.

Во всем, что касается обучения, я не меньший кибероптимист, чем Айзек Азимов, чита Гейтсов и многие другие.

Почти оптимальным решением может оказаться идея восполнять пробелы в знаниях при помощи Википедии, причем без заранее составленного плана. Интернет позволяет учащемуся получать ответы на вопросы в момент их возникновения — на волне подогретого любопытством интереса именно к данной теме. В этом, кстати, заключается принципиальное различие между знаниями «про запас» (сведениями и фактами, получаемыми учеником на всякий случай) и знаниями ко времени (сведениями и фактами, получаемыми в момент, когда они его интересуют). В целом мы только в последнем случае обнаружим правильное сочетание нейромодуляторов.

У китайцев есть старинная пословица: «Час общения с мудрецом стоит больше тысячи прочитанных книг». Это изречение доносит до нас из древности способ познания, эквивалентный тому, который сегодня предлагает интернет: учащийся может активно направлять процесс собственного обучения (задавая «мудрецу» вопросы конкретно о том, что хочет узнать), в его мозге присутствуют химические вещества, отвечающие за

релевантность и вознаграждение. Они дают мозгу добро на изменения. Забрасывать фактами незаинтересованного, скучающего ученика — все равно что лбом пробивать каменную стену. Или пытаться заставить Фреда Уильямса полюбить теннис.

В свете сказанного огромные перспективы открывает игрофикация обучения. Адаптивные обучающие программы заставляют учащегося задержаться на теме, которая ему не дается (и это его расстраивает, хотя ответ найти можно). Если что-то не получается, система продолжает задавать ему вопросы на том же уровне, а когда он дает правильный ответ, вопросы усложняются. Этот метод обучения все еще не исключает роли преподавателя, который знакомит ученика с основными понятиями и направляет его обучение. Но по большому счету, если учитывать, как мозг адаптируется и перемонтирует свою систему связей, совместимый с нейробиологией метод обучения — тот, при котором учащийся углубляется в сферу обширных человеческих знаний, увлекаемый собственными интересами и настроенностями.

\*\*\*

Итак, будущее образования выглядит вполне благоприятным, хотя остается вопрос: если мозг выстраивает нейронные связи, опираясь на опыт, каковы будут последствия для тех, кто с детства глядит на экраны компьютеров и гаджетов? Отличается ли мозг детей цифровой эпохи от мозга предыдущих поколений?

Многих удивило бы, насколько в нейробиологии мало исследований по данной столь важной тематике. Неужели наше общество не хочет узнать, в чем разница между мозгом, с рождения погруженным в цифровую среду, и мозгом, который сформировался в нашем аналоговом прошлом?

Разумеется, мы хотим понять это — и поймем, — но причина малочисленности научных исследований в данном случае в том, что проводить их на содержательном уровне необычайно сложно — хотя бы потому, что у нас нет контрольной группы, с которой можно сравнивать мозг тех, кто родился в цифровую эпоху. Вы не сумеете собрать группу 18-летних, которые бы выросли без общения с интернетом. Можно, конечно, обратиться к общине амишей\* в Пенсильвании, но у 18-летних

---

\* Амиши — одно из самых консервативных религиозных направлений. Отличаются простотой жизни и одежды, нежеланием применять многие современные технологии и удобства; интернет, телевидение и радио у них запрещены. В настоящее время большинство амишей проживают в США и Канаде. *Прим. ред.*

амишей и без этого множество отличий в воспитании, включая религиозные, культурные и образовательные воззрения. Где еще найти молодых людей нужного возраста, не имеющих доступа к интернету? Можно было бы обратить взоры на беднейшее население в сельской глубинке Китая, в Центральной Америке или в Сахаре. Но помимо отсутствия доступа к интернету эти подростки во многом другом отличаются от «цифровых» детей, которых вы желаете понять и изучить, в том числе с точки зрения благосостояния, уровня образования и питания. Возможно, удалось бы сравнить миллениалов с предыдущим поколением, скажем с их родителями, которые уж точно не воспитывались в обнимку с гаджетами, а играли на улице в футбол или объедались кексами «Твинки», смотря по телевизору очередную серию «Семейки Брейди». Но и родители не спасут положения: у них и их детей тоже слишком много расхождений в части воззрений на политику, питание, загрязнение окружающей среды и разнообразные культурные новшества — и все это не дает уверенности, что выявленные нейронные различия было бы правильно отнести на счет именно интернета и прочих достижений цифровизации.

Провести эксперимент, выявивший воздействие интернета на рост и воспитание мозга, в хорошо контролируемых условиях — трудная проблема. И все же не могу не поделиться источником своего оптимизма. Никогда прежде у нас не было в кармане плоской коробочки, заключающей в себе все знания человечества, доступные постоянно и мгновенно. Кое-кто из читателей еще помнит походы в библиотеку: достаешь с полки увесистый том Британской энциклопедии (скажем, на букву Н) — и давай листать страницы в поисках нужного слова. Соответствующая статья писана десяток-другой лет назад, и остается лишь надеяться, что она все еще соответствует действительности, а иначе придется перебирать карточки в каталожных ящиках, опять же в надежде, что в этой библиотеке найдется хоть какой-то еще материал по интересующей тебя теме. А потом родители ведут тебя домой, потому что уже пора обедать.

Но этот порядок вещей в ошеломительно короткие сроки стал другим. В итоге мы видим, как поменялся характер наших споров за обеденным столом: теперь в них побеждает не тот, кто громогласнее или убедительнее остальных, а тот, кто проворнее всех выхватит из кармана мобильник и моментально найдет ответ на обсуждаемый вопрос. И потому дискутируем мы нынче не в пример быстрее, лихо перескакивая с одного решенного вопроса на другой. Даже когда мы в одиночестве, процесс обучения не прерывается — он продолжается,

## Живой мозг

когда нам хочется найти заинтересовавшее нас слово в Википедии, а она увлекает нас каскадом ссылок все глубже и глубже, и шестью ссылками позже мы узнаём нечто, о чем даже не знали, что мы этого не знаем.

Огромное преимущество такого подхода проистекает из одного простого факта: все попадающие в наш мозг новые идеи произрастают из попурри ранее усвоенных входных данных, а их мы сегодня получаем больше, чем когда-либо прежде<sup>25</sup>. Сегодняшние дети растут в условиях беспримерного богатства: круг наших знаний неизмеримо расширился и продолжает расширяться, предлагая нам все больше новой информации. Юным мозгам предоставлена возможность отыскивать перекрестные связи между фактами из разных областей знаний и генерировать идеи, о каких в прошлые века не могло помыслить даже самое богатое воображение. Это отчасти объясняет экспоненциальный рост образованности человечества: у нас ускорились коммуникации, а совокупность получаемой информации обширнее, чем когда-либо. Пока неясно, каковы будут социальные и политические последствия использования интернета, но с точки зрения нейробиологии он открывает нам дорогу к более богатым и разносторонним знаниям.

\*\*\*

В предыдущих главах мы рассматривали перемены в мозге, вызванные изменениями в строении тела, оперируя такими понятиями, как сенсоры и конечности. В этой главе мы обратились к изменениям, которые происходят под действием двигательной практики или вознаграждающих сенсорных сигналов. Указанные сценарии объединяет принцип более высокого порядка — актуальность. Ваш мозг адаптируется к тому, чему вы посвящаете свое время, до тех пор, пока эти занятия обеспечивают вам вознаграждение или укладываются в ваши цели. Для потерявшего зрение расширение функций других органов чувств приобретет повышенную актуальность, и это глубокая причина, лежащая в основе изменений в его мозге, позволяющая представительствам других органов чувств захватить его зрительную кору. Если незрячий водит пальцами по выпуклостям шрифта Брайля, но не мотивирован изучить его, нейронные связи у него не изменятся ввиду отсутствия правильного набора нейромодуляторов. Аналогично, если добавленная к вашему телу телеконечность для вас актуальна, оно освоит ее использование, как научилась использовать необычное строение тела собака по кличке Фэйт.

## Глава 6. Почему значение имеет значение

В целом принцип адаптации на основе актуальности позволяет нам понять, как животные, постоянно получая разнообразные повреждения, умудряются не утрачивать подвижность за счет того, что их мозг при необходимости адаптируется, чтобы сохранить возможность преследовать свои цели. Ниже будет рассказано, как использовать этот принцип при создании роботов нового типа, которые продолжат функционировать, даже если сломается ось, сгорит часть материнской платы или разболтается какой-нибудь винтик.

Но прежде надо понять, что объединяет симптомы отмены наркотических веществ и переживание горя и почему такое понятие, как неожиданность, играет столь значимую роль в мозговой алхимии.

# ГЛАВА 7

## ПОЧЕМУ ГЛУБИНА ЛЮБВИ ПОЗНАЕТСЯ ЛИШЬ В ЧАС РАЗЛУКИ?

В 1980-е годы десятки тысяч людей стали замечать непонятное явление. Когда они смотрели на конверт от дискеты, украшенный черно-белым логотипом IBM, им казалось, что буквы слегка отливают красным. Такая же странность поджидала их на книжных страницах: типографский текст тоже давал красноватый оттенок, причем ни до 1980-х годов, ни после никто ничего подобного не наблюдал. Какие же изменения произошли в человеческом мозге в этом временном окне? Чтобы разобраться в сути явления, нам придется вернуться на 2400 лет назад.

### Лошадь посреди реки

Первую в истории запись о зрительной иллюзии сделал славившийся наблюдательностью Аристотель. Однажды он увидел застрявшую посреди быстрого горного потока лошадь и людей, пытавшихся вытащить ее. Движимый состраданием, Аристотель сосредоточенно следил за спасательной операцией, не отрывая глаз. Когда же он наконец отвел взгляд, ему показалось, что все вокруг — скалы, деревья, сама земля — движутся в противоположную течению реки сторону.

Если вы хотите пережить смутившее Аристотеля, хотя и приятное ощущение, простейший способ — пристально смотреть на водопад. На некоторое время сосредоточьте взгляд на низвергающихся потоках воды, а потом переведите его на боковой скальный склон. И вам покажется, что скала движется вверх.

Эта известная оптическая иллюзия называется *эффект постдвижения*. Почему так происходит? В вашей зрительной коре активность

определенной группы нейронов передает нисходящее движение, а активность другой группы — восходящее. Обе группы обречены на вечную борьбу. Большую часть времени битва идет на равных и обе стороны в одинаковой степени подавляют одна другую. В итоге вы видите, что мир не поднимается и не опускается.

С учетом сказанного самое распространенное объяснение эффекта постдвижения — утомление: от долгого наблюдения за нисходящим движением кодирующие его нейроны в зрительной коре успевают израсходовать значительную часть своей энергии, из-за чего их сила на некоторое время истощается. И, значит, перевес в вечной битве получают нейроны, отвечающие за восходящее движение. Из-за этой разбалансировки вы и наблюдаете эффект восходящего движения.

Гипотеза утомления привлекает своей простотой. Но, увы, она неверна и некоторые существенные факты иллюзии не объясняет. Предположим, вы какое-то время пристально смотрите на водопад, а потом вам плотной повязкой закрывают глаза часа на три. Снова открыв глаза, вы увидите, что горные склоны по бокам водопада движутся вверх. Вот вам и доказательство, что временное истощение нейронов к этой оптической иллюзии не имеет отношения, ее корни лежат где-то глубже.

Иллюзия образуется не из-за пассивного утомления, а, напротив, в силу активной перенастройки. Вы предъявляете зрительной системе картину нисходящего движения мира, и через некоторое время у мозга возникает предположение, что это новая норма. Поначалу мозг расценивает нисходящее движение как информацию поистине сенсационного свойства, но на протяжении некоторого времени она остается стабильной. Мозг принимает это как новую реальность: мир скорее сползает вниз, чем поднимается. Ваша зрительная система тщательно перенастраивается, чтобы отражать новую нормальность мира и ожидать больше нисходящего, чем восходящего движения. Но когда вы переводите взгляд с водопада на неподвижный боковой склон, перенастроенная установка зрительной коры со всей очевидностью бросается в глаза, потому что теперь скалы и деревья всплывают к небесам. Установка (то есть то, что именно считать неподвижным), как видите, изменилась<sup>1</sup>.

Так происходит потому, что система всегда желает установить точку отсчета, некий эталон, позволяющий лучше и точнее выявлять изменения. В нашем случае, когда ваше поле зрения заполняется видом водопада, мозг прилагает усилия, чтобы изъять из картины нисходящее движение (теперь всякий нисходящий поток для него больше не информативен, так как стал точкой отсчета), и потому нейронные связи

корректируются, чтобы максимально чутко воспринимать новую информацию.

Активную перенастройку такого сорта вы переживаете довольно часто. Скажем, когда вы высаживаетесь из лодки, вас некоторое время преследует ощущение, что земля под вами колышется, как будто вы все еще на воде. Это так называемое *обратное последействие* — нечто вроде негативного восприятия движения воды.

Вы также замечали подобные иллюзии, если практикуете бег. Мозг привычно посыпает ногам двигательные команды (*беги!*), вы ускоряетесь, и входные зрительные сигналы проплывают мимо вас. Но когда вы находитесь на беговом тренажере, мозг не получает проплывающих мимо зрительных сигналов — вместо этого вы все время смотрите на стену перед вами. Сойдя с тренажера, вы переживаете тренажерную иллюзию: при каждом шаге в сторону раздевалки вам кажется, что окружающая обстановка проплывает мимо вас быстрее, чем полагалось бы, и у вас возникает впечатление, что вы движетесь быстрее, чем на самом деле<sup>2</sup>. Здесь, как и в случаях с Аристотелевой лошадью, водопадом и шаткостью почвы после катания на лодке, ваш мозг перестраивает свои ожидания относительно реальности — движение ваших ног должно преобразоваться в проплывающий мимо визуальный ряд.

Вот еще один пример. Посмотрите на изображенные ниже черные и белые полоски (рис. 7.1). Вроде бы в них нет ничего особенного, верно?

А теперь взгляните на квадраты в черно-красную и черно-зеленую полоску на сайте [eagleman.com/livewired](http://eagleman.com/livewired): зеленые полоски располагаются горизонтально, красные — вертикально. На несколько секунд задержите взгляд на красных полосках, потом на зеленых, затем опять на красных, а после снова на зеленых. Проделывайте этот цикл в течение примерно трех минут.

Теперь снова вернитесь к белым и черным полоскам на рис. 7.1. Вы увидите, что пространство между горизонтальными линиями приобрело красноватый оттенок, а между вертикальными — зеленоватый<sup>3</sup>.

Почему так произошло? Потому что, пока вы сосредоточенно рассматривали цветной рисунок, мозг осознал, что зеленый цвет теперь связывается с горизонтальными линиями, а красный — с вертикальными, и соответственно адаптировался, исключив из своей картины реальности это странное свойство. Когда вы снова сосредоточили взгляд на черно-белых полосках, возник эффект последействия: мозг начал сдвигать горизонтальные полоски в сторону противоположного цвета — красного, тогда как вертикальные, наоборот, в сторону

зеленого. (Снова повторюсь, к утомлению нейронов данный эффект никакого отношения не имеет. В 1975 году двое исследователей показали, что если пристально смотреть на красные и зеленые линии в течение 15 минут, то эффект последействия может продлиться три с половиной месяца<sup>4</sup>.)

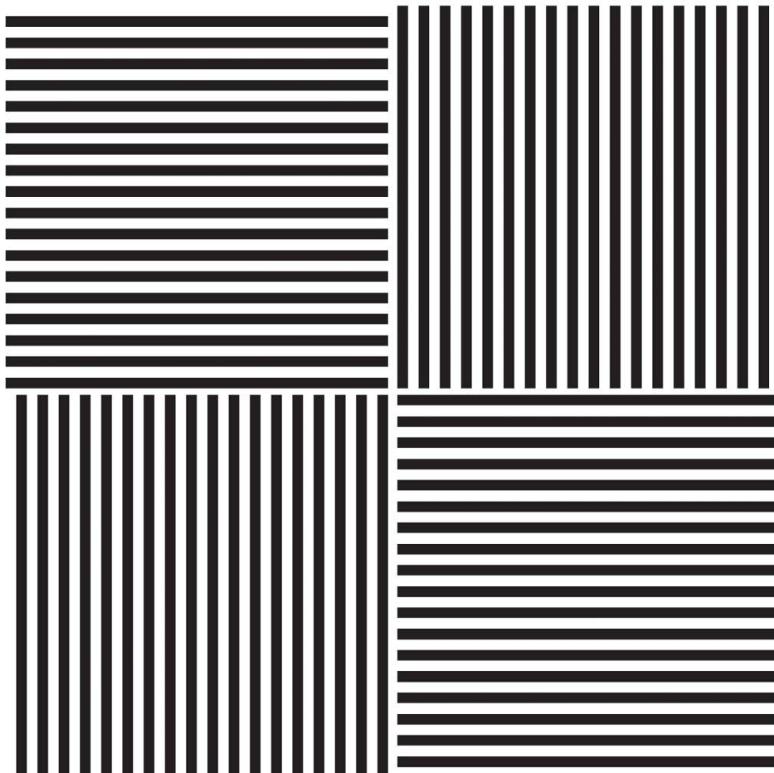


Рис. 7.1. Четыре квадрата

Активная переоценка окружения и есть причина, почему в 1980-е годы многие люди замечали, что текст в книгах отливает красноватым оттенком. Напомню, что в тот период началось массовое использование компьютерных мониторов для набора и редактирования текстов. Но у тех ранних экранов, в отличие от современных, возможности цветопередачи были ограничены только зеленым цветом на черном фоне. В итоге множеству людей приходилось по многу часов сосредоточенно смотреть на набранные зеленым шрифтом горизонтальные строки. И потому, когда они потом открывали бумажную книгу, строки черного

шрифта оттенялись в их восприятии дополнительным цветом — красноватым. Мозг приспосабливался к реальности, где горизонтальные строки имели зеленый цвет, соответствующим образом менялась и их внутренняя реальность. Пользователи компьютеров испытывали ту же оптическую иллюзию, глядя на логотип IBM, украшавший обложку фирменных дисков компании (рис. 7.2): в их глазах он приобретал красноватый оттенок. Дизайнеры IBM пребывали в большом замешательстве: кто-кто, а они наверняка знали, что черно-белые обложки печатаются в типографии без добавки красной краски. Но клиенты, хоть убейся, доказывали, что логотип имеет красноватый оттенок.



Рис. 7.2. Логотип IBM

Вывод таков: ни движение в реальном мире, ни то, насколько тверда земля под ногами, ни проплывающие мимо картины, когда мы переставляем ноги, ни насыщенность линий каким-либо конкретным цветом — ничто из перечисленного не предопределено в нашем мозге генетикой, а настраивается под влиянием нашего чувственного опыта.

## Как ожидаемое становится невидимым

Если смотреть на однообразную (в смысле отсутствия каких-либо особенностей) одноцветную картину (предположим, желтую), мозг быстро отметит этот цвет как нейтральный. Сделайте вот что: возьмите желтый шарик для пинг-понга и аккуратно разрежьте на две половинки. Поместите по одной на каждый глаз, и мир тут же предстанет перед вами сплошным желтым одеялом. Однако очень скоро вы вообще перестанете воспринимать окружающее и перед глазами появится сплошная бесцветная пелена, словно вы лишились зрения. Зрительная система пришла к заключению, что мир пожелтел и теперь это нормально, а потому

исключила желтый цвет из вашего восприятия, чтобы усилить чувствительность к другим переменам в реальности.

Для подобного «исчезновения» цвета необязательно, чтобы картина была лишена каких-либо характерных особенностей. В 1804 году швейцарский врач Игнац Трокслер заметил странную вещь: если зафиксировать взгляд в центральной точке посреди расположенных по окружности кружков, происходящая на периферии зрения кипучая активность в конце концов исчезнет. На рис. 7.3 фиксируйте взгляд на черной точке посреди картинки с расположенными по периферии кружочками в течение примерно десяти секунд. Не переводя взгляд на кружочки, вы заметите, что они исчезают, словно растворяясь в воздухе, и вскоре осознáете, что смотрите в пустое серое пространство.

Эта иллюзия, известная как эффект Трокслера, демонстрирует, что неизменный стимул, наблюдаемый боковым зрением, скоро исчезнет. Почему так происходит? Потому что полезная информация должна обновляться, а все, что сохраняет неизменность, система попросту игнорирует.

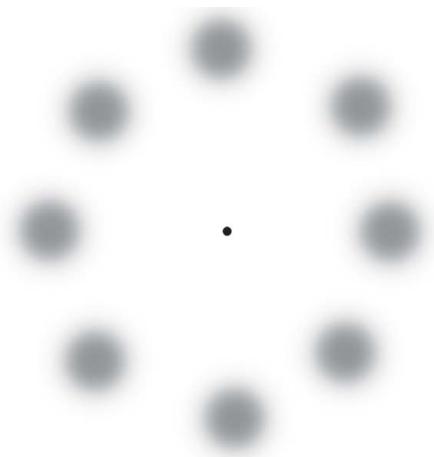


Рис. 7.3. Эффект Трокслера. Удерживайте взгляд на центральной точке, и темные кружочки постепенно исчезнут, как будто их и не было

Тогда почему ваша кухня или кабинет со всеми неподвижными предметами обстановки по-трокслеровски не исчезают из вашего зрительного восприятия? Во-первых, большинство объектов мира состоит из острых краев и углов, а за них зрительной системе зацепиться проще, чем за круги с монотонными очертаниями. Однако на то имеется и более

основательная причина. Хотя вы в целом этого не осознаёте, ваши глаза постоянно скачут и прыгают по сторонам. Вглядитесь в глаза своей подруги: вы заметите, что ее глазные яблоки совершают по три быстрых скачка в каждую секунду бодрствования. Если наблюдать еще внимательнее, обнаружится, что в промежутках между скачками глазные яблоки постоянно слегка подрагивают<sup>5</sup>. Может быть, с ней что-то не в порядке? Ничуть. Эти быстрые движения — как крупные, так и мелкие — поддерживают свежесть изображения на сетчатке. Хотя ваша визави этого не осознаёт, ее глаза усердно трудятся, чтобы поддерживать постоянно меняющийся образ реальности. Зачем им эта морока? Дело в том, что любой образ, прочно зафиксированный на сетчатке в одном и том же положении, через какое-то время станет невидимым.

Вот как можно доказать себе правоту этого утверждения. Если вы носите контактные линзы, возьмите маркер и нарисуйте на внешней стороне одной из них, прямо посередине, крошечный значок. Вернув линзу в глаз, вы заметите, что на ней что-то изображено, однако это продлится недолго: крохотный рисунок быстро растворится в невидимости<sup>6</sup>. Данный феномен подчеркивает основополагающий факт: мозг чутко отслеживает перемены. Как при эффекте Трокслера, неизменные особенности обстановки дают мало информации об окружающей реальности. Вся значимая информация поступает от элементов обстановки, пребывающих в состоянии изменения.

Если вы не носите контактные линзы, не расстраивайтесь: вы и так, сами того не подозревая, иногда проводите подобный эксперимент. В задней части глаза, над сетчаткой, пролегает сеть кровеносных сосудов. Она должна накладываться на все, что вы видите, поскольку располагается между фоторецепторами и видимым миром. Однако в вашем восприятии эта сеть невидима: она зафиксирована относительно сетчатки так же, как рисунок на контактной линзе. Сколько бы движений ни делали ваши глаза, они никогда не «обновляют» образ сосудов, которые находятся между вами и миром, но в какой-то момент исчезают, как по мановению волшебной палочки (рис. 7.4).

Вы могли на какие-то мгновения заметить их при осмотре у офтальмолога, когда доктор светил вам в глаза точечным фонариком<sup>7</sup>. Под лучом направленного света сосуды могут отбрасывать тени под необычным углом, и тогда зрительная система внезапно улавливает их. Так происходит потому, что в вашей сетчатке только что случилось нечто непредвиденное, и это единственный случай, когда вы можете увидеть густую сеть сосудов, заслоняющую обзор. (Если вы никогда не видели сосудистую систему собственного глаза, отложите книгу, пойдите в темную

комнату и посветите себе в глаз точечным фонариком, но обязательно под углом. Вы увидите, как перед глазами появляются переплетения сосудов. Зрительная система довольно быстро приспособится к внезапно вспыхивающему свету, и хитрость заключается в том, чтобы менять угол освещения, желая сохранить изображение.)

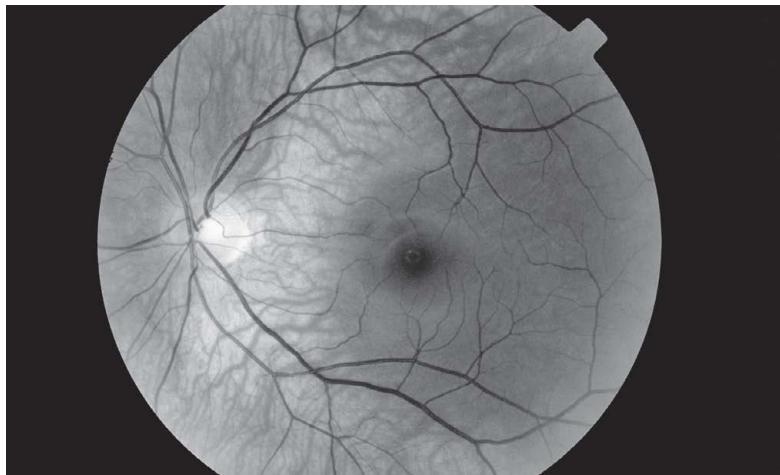


Рис. 7.4. Сетчатка покрыта густой сеткой кровеносных сосудов. А поскольку они располагаются перед фотопрерцепторами, то есть накладываются на видимую нам картину мира, мы, по идеи, должны видеть их во множестве. Однако постоянное и неизменное расположение сосудов не дает нам новой информации, поэтому зрительная система полностью игнорирует их

Стратегия игнорирования всего неизменного поддерживает зрительную систему в готовности отмечать все, что движется, шевелится или меняется. Крайнее проявление данной стратегии мы наблюдаем у рептилий: если вы замрете, они не смогут увидеть вас, потому что их зрительная система регистрирует исключительно изменения в картинке, а само по себе ваше место в пространстве их не интересует. Зрительная система рептилий доказала свою абсолютную состоятельность: недаром они живут и процветают на протяжении десятков миллионов лет.

Давайте вернемся к оптической иллюзии водопада. Почему бы вашей зрительной системе не подстроиться к его восприятию настолько, чтобы водопад воспринимался как нечто неподвижное? Но перенастройка может иметь свои ограничения<sup>8</sup>: зрительной системе просто не хватает сил, чтобы изъять из визуальной картины столь внушительное нисходящее движение воды. Впрочем, возможно и другое: вы недостаточно долго смотрели на водопад, в противном случае система перенастроилась бы

по полной программе. Сколько времени это потребовало бы? Два месяца пристального созерцания? Два года? В теории, если бы вам пришлось достаточно долго взирать на водопад, краткосрочные перемены в зрительной системе в конце концов привели бы к более долговременным переменам, что в свою очередь вызвало бы изменения в самых глубинных ее уровнях (к феномену таких каскадных изменений мы вернемся в главе 10). Движение, постоянно присутствующее фоном в зрительной картинке, становится для нас невидимым.

Сказанное подталкивает нас к безумной, но логически обоснованной догадке: а вдруг некие элементы реальности, которые мы не видим, на самом деле должны быть для нас очевидны? Допустим, например, что космический дождь постоянно моросят на протяжении всей нашей жизни. Тогда он будет для нас невидимым, потому что наша прилежная зрительная система, никогда не фиксировавшая, чтобы дождь падал вверх, сведет его вечное нисходящее движение к нулю. Если же он вдруг прекратится, нам покажется, что весь мир внезапно поехал вверх, и мы уверимся, что произошло некое событие — восходящий дождь, — хотя на самом деле он, наоборот, только что кончился. Подобная ситуация возможна в любом сенсорном канале: представьте нескончаемые бип-бип-бип космического будильника, не снабженного кнопкой отбоя. Он бибикает и бибикает на весь космос: бип-бип-бип-бип. Если подобные звуки строго равномерны, вы никогда не услышите их, поскольку мозг привыкнет к ним и перестанет фиксировать. Но если этот будильник внезапно замолкнет, все земляне в одночасье услышат великое бип-бип-бип, не имея понятия, что переживают эффект последействия, причем этот внешний звук будет звучать исключительно в их головах<sup>9</sup>. Успешная адаптация переводит обыкновенности в разряд ненаблюдаемого.

## Разница между тем, что, как вы думали, должно случиться, и тем, что на самом деле случилось

До сих пор мы рассматривали всевозможные иллюзии как результат адаптации мозга, но их можно рассматривать и с других позиций: как предвидение. Если вы вычитаете из своего восприятия нисходящее движение водопада, зыбкость земли после катания на лодке или крохотный значок на контактной линзе, это равносильно предсказанию, что данное явление будет существовать и дальше. Нейронная сеть, приспособливаясь

к чему-то, выстраивает предположение, какой в следующий момент станет реальность. Мозг прекращает обсуждать новость, которая, согласно его ожиданиям, будет иметь продолжение. Например, кровеносные сосуды сетчатки визуально не воспринимаются, потому что зрительная система исключает их из своего предвидения, зная, что они никуда не денутся, и перестает принимать их в расчет. Только когда ожидания нарушаются (скажем, луч фонарика освещает сосуды под непривычным углом), мозг соизволит затратить энергию, чтобы освежить эти данные. Он не желает нести энергетические издержки из-за возбужденных нейронов, и потому его цель — настроить сеть так, чтобы расход энергии был минимальным.

Если поток шаблонов предсказуем — или хотя бы частично угадываем, — зрительная система сберегает энергию подстройкой своей структуры под эти входные данные, чтобы не воспринимать их как неожиданность. Спокойствие нервной системы означает, что события во внешнем мире развиваются примерно так, как и ожидалось. Иными словами, мозг в целях экономии желает исключить из своего предвидения как можно больше предсказуемого, чтобы сберечь максимум энергии на распознание и представление непредвиденного, — молчание, знаете ли, золото. Хотя многие нейробиологи считают, что активность нейронов отражает порядок вещей в окружающей реальности, не исключено, что все окажется с точностью до наоборот: импульсы могут представлять собой именно непредвиденную, энергетически затратную часть, а представление чего-то ожидаемого выражается тишиной в нейронных лесах.

Система корректируется, только когда происходит что-то необычное. Если мозг считает, что все кирпичи весят одинаково, а вы взялись поднять кирпич из литого свинца, ваши ожидания грубо нарушаются, что запускает каскад перемен для преодоления такого поворота событий. И наоборот, когда все предвиденное успешно исключено из прогноза, нет надобности что-то менять. Вот почему, впервые глядя на картинку Трокслера, вы замечаете ободок из темных кружков, а в первый раз вставляя в глаз контактную линзу с нарисованным значком, видите его. Но вскоре мозг адаптируется и становится невосприимчив к иллюзиям — ему больше нечему удивляться.

Рассмотрим еще один пример предсказаний мозга. Глухие люди, впервые надевшие Neosensory-браслет (напомню, он трансформирует звуки в вибрации на коже), обычно изумленно восклицают: «Смотри-ка, он ловит мой собственный голос!» Это всегда немного пугает: по идее, они не должны слышать собственную речь. (Обычный человек всегда улавливает звук своего голоса. При разговоре он звучит для него громче

голосов собеседников, потому что рот ближе всего к ушам. Однако человек, лишенный слуха, зачастую может спрогнозировать, как будут звучать произносимые им звуки, но едва ли слышит себя.) Пользователей браслета поражает также громкость других предсказуемых звуков, на которые обычно мало кто обращает внимание: шум спускаемой воды в туалете, стук закрывшейся за ними двери, звук своих шагов. И дело не в том, что слуховая система не улавливает эти звуки, а в том, что глухие люди активно предсказывают их возникновение. При ношении браслета это проявляется в полной мере: вы и поверить не можете, насколько громкий звук у этих «событий», потому что мозг еще не научился предсказывать поступающие от запястья сигналы.

\*\*\*

Итак, ваш мозг активно изменяется, потому что это позволяет ему затрачивать меньше энергии. Но здесь действует и более глубинный принцип: в своих черепных потемках мозг стремится выстроить внутреннюю модель внешнего мира.

Дома вы уделяете мало внимания окружающей обстановке, потому что у вас уже есть ее модель. Другое дело, когда вы едете по незнакомому городу в поисках дороги к определенному ресторану. Тут вы вынуждены внимательно смотреть по сторонам — на таблички с названиями улиц и вывески магазинов, дорожные знаки и номера домов, — потому что мозг еще не имеет надежной модели, чтобы оправдать ваши ожидания.

А кстати, как вы выстраиваете корректную внутреннюю модель реальности? В чем состоит нейронная технология, позволяющая вам брать крупным планом те единицы информации, которые не соответствуют вашим ожиданиям, а все уже учтенное попросту игнорировать?

Вы обращаете внимание на внезапный громкий звук, неожиданное прикосновение к коже, необычное движение на периферии поля зрения. Интерес позволяет вам мобилизовать ваши чувствительные сенсоры на исследование проблемы и решить, как вписать обнаруженные непредвиденности в вашу модель («Ах, так это сосед включил газонокосилку, это котенок обо что-то потерся, а это муха пролетела»). В результате модель обновляется. И наоборот: вы не реагируете на присутствие тапки на левой ноге, поскольку он уже отображен в вашей модели, которая последовательно предсказывает, какие ощущения вы от него можете получить. До тех пор, по крайней мере, пока внутрь не попадет камешек. Тут-то ваше внимание и обратится к тапке, потому что ваша внутренняя модель внезапно потребует обновления.

Различие между прогнозами и реальными исходами дает нам ключ к пониманию одного странного свойства обучения: если вы предвидите что-то безошибочно, вашему мозгу нет нужды меняться дальше. Предположим, вы усвоили, что сигнал вашего мобильника предсказывает вам пришло сообщение. Мозг быстро выучит связь между двумя событиями, главным образом в силу того, что текстовые сообщения обычны для вашей социальной жизни. Дальше предположим, что в мобильнике обновились программы, в результате чего он реагирует на новое сообщение сигналом плюс вибрацией. И тут выясняется, что ваш мозг не натренирован на вибрацию мобильника (данный эффект называют блокированием). Мозг уже знает, что сигнал предсказывает новое сообщение, и потому не видит необходимости усваивать что-то новое по этому поводу. Но если мобильник только завибрирует, а сигнал не прозвучит, мозг не будет знать, как разгадать эту загадку; в данном контексте он ничему не обучен<sup>10</sup>. Блокирование приобретет смысл, если мы поймем, что изменения в мозге наступают только там, где есть разница между ожиданиями и реальностью.

Наша внутренняя модель мира позволяет нам делать предсказания и быстро замечать ошибки в прогнозах, указывающие, на что обратить внимание и в каком направлении обновить ее. К системе подобного рода все больше интереса проявляют инженеры и конструкторы в размышлениях о будущем машинного оборудования: несколько компаний разворачивают работу над устройствами, действующими по этому принципу, — от тракторов и тягачей до самолетов. Внутренняя модель мира позволит машине составлять наилучшие прогнозы относительно хода ожидаемых событий. Если все идет в соответствии с прогнозом, выстроенным алгоритмами машины, менять ничего не требуется. И только если входные данные прогнозом не предусмотрены, программная начинка устройства должна встрепенуться, разобраться, что происходит, и соответствующим образом обновить его внутреннюю модель мира.

\*\*\*

Имея это в виду, мы легко поймем, как модифицируют нервную систему постоянно принимаемые наркотические вещества и некоторые лекарственные препараты. Их потребление меняет число соответствующих рецепторов для определенных химических соединений настолько, что при вскрытии путем замера молекулярных изменений в мозге можно определить, зависимостью от какого вещества страдал умерший. Именно по этой причине человек с зависимостью становится нечувствителен (или толерантен) к веществу: мозг приспособился прогнозировать его

присутствие посредством экспрессии соответствующих рецепторов таким образом, чтобы сохранять устойчивое равновесие при поступлении следующей дозы. Мозг буквально физически ожидает, что вещество вот-вот появится, и соответственно отлаживает биологический механизм. И поскольку отныне система прогнозирует присутствие определенного количества вещества, ей, чтобы возбудиться до первоначальных ощущений, требуется еще большее его количество.

Такая перенастройка служит основой тяжелых симптомов абстиненции. Чем больше мозг адаптирован к веществу, тем тяжелее состояние после его отмены. Симптомы отмены различаются в зависимости от препарата — от потоотделения и дрожи до депрессии, — но все они объединены отсутствием чего-то ожидаемого.

Представление о нейронных прогнозах также помогает понять переживание горя. Люди, которых вы любите, становятся частью вас — не только метафорически, но и физически. Вы помещаете их в свою внутреннюю модель мира. Ваш мозг настроен ожидать их присутствия. После разрыва с любовником, смерти друга или потери родителя внезапное отсутствие близкого человека представляет собой серьезное отклонение от гомеостаза. Как сказал Халиль Джебран\* в книге стихотворений в прозе «Пророк», «глубина любви познается лишь в час разлуки».

В этом смысле ваш мозг подобен негативу изображения всех тех, с кем вы поддерживаете контакт. Возлюбленные, друзья и родители заполняют ожидаемые формы в вашем мозге. Так же, как вы после катания на лодке ощущаете, будто все еще покачиваетесь на волнах, или жаждете какого-то вещества, не получив его, так и мозг требует присутствия в нем людей, составляющих круг вашего общения. Когда кто-то из них уезжает, отвергает вас или умирает, мозг пытается совладать с порушеными ожиданиями. Но с течением времени ему приходится перестраиваться под реальность, в которой желанный человек отсутствует.

## Тянуться к свету. Или к сахару. Или к информации

Рассмотрим явление фототропизма у растений — когда они принимают положение, позволяющее улавливать максимум света. Если понаблюдать за ростом растения в ускоренном воспроизведении, видно, что растет

\* Халиль Джебран (1883–1931) — ливанский и американский философ, художник, поэт и писатель. Прим. ред.

## Глава 7. Почему глубина любви познается лишь в час разлуки?

оно не «по прямой» к источнику света, а, напротив, чуть отклоняется то в одну, то в другую сторону. Словом, оно не действует в соответствии с заранее составленным планом, а исполняет нервный, дерганый танец, постоянно внося поправки направления.

Аналогичная стратегия движения отмечается у бактерий. В поисках центра источника питания — например упавшей на кухонный стол кручинки сахара — они прокладывают курс к добыче, следуя трем элегантно-простым правилам.

1. Выбери направление случайным образом и двигайся по прямой.
2. Если обстановка улучшается, продолжай движение.
3. Если обстановка ухудшилась, случайным образом меняй направление — кувыркнись куда придется и снова двигайся по прямой.

Иными словами, стратегия заключается в том, чтобы следовать тому или иному подходу, когда он приводит к улучшению условий, и отказываться от него, если он неэффективен. Посредством такой нехитрой политики бактерия способна быстро и успешно добраться в точку, где источник питания насыщеннее всего<sup>11</sup>.

Предполагаю, что и в мозге действует тот же простой принцип. Правда, вместо стремления в места, где больше всего света или пищи, мозг тянется туда, где больше всего информации. Я называю эту стратегию инфотропизмом. Гипотеза инфотропизма предполагает, что нейронная сеть постоянно меняется, подстраивается к окружающей среде, чтобы извлечь и поглотить максимум информации.

В главе 5 мы видели, как мозг научается задействовать органы чувств — неважно, улавливают ли они фотоны, электрические поля или молекулы пахучих веществ. И приводить в движение тело, какими бы двигательными органами оно ни обладало — ногами, плавниками или робоконечностями. В любых заданных условиях мозг тонко настраивает свои нейроны для максимизации поступающих от мира потоков данных. Подстройке содействуют вознаграждения, которые широко транслируются по всей сети, оповещая, что операция по адаптации к изменениям проведена успешно. Таким путем система при минимуме предустановленных программ самостоятельно оптимизирует свое взаимодействие с реальностью.

Например, мы узнали, как формируют сами себя нейронные ландшафты у младенца Хаято из Осаки и у малыша Уильяма из Пало-Альто, что позволяет им различать разные звуки. В главе 6 я иллюстрировал этим примером модификации на основе вознаграждения, но сейчас мы

можем расценить это как явление более высокого порядка — инфотропизм: мозг каждого младенца приспосабливается под максимизацию притока данных, значимых в его конкретной реальности.

Если рассматривать это явление в более длительном временнóм масштабе, то, как мы уже видели, зрительную кору ослепшего индивида занимают проекции других органов чувств. В главе 8 мы изучим, как именно нейроны проделывают подобный трюк, а сейчас заметим, что захват кортикальной территории тоже можно расценивать как инфотропизм: мозг максимизирует свои ресурсы, чтобы истолковывать любые поступающие в него данные. Теперь вспомним оптическую иллюзию с окрашенными горизонтальными и вертикальными полосками. Ваша зрительная система прикладывает усилия, чтобы различать их цвета и ориентацию, потому что старается получить от реальности максимум информации. А зрительная кора не желает сваливать в одну кучу параметры, которые можно разделить. Хотя этот эффект обычно воспринимают как забавный оптический курьез, кора выполняет такую работу по более серьезной причине: если нечто (скажем, необычный верхний свет или дефект в вашей оптике) придает полоскам какой-то оттенок, мозг непременно реорганизуется, чтобы принять меры, то есть исключить данную взаимосвязь. Таким образом он максимизирует вашу способность извлекать информацию о цветности и пространственной ориентации линий по отдельности. За счет разделения этих двух свойств, которые (статистически) не должны иметь связи, мозг может наилучшим образом черпать информацию из внешнего мира.

Приведу пример инфотропизма на уровне нейронов: сетчатка (расположенная на задней стенке глаза) по-разному воспринимает мир в дневное и ночное время. При ярком полуденном свете ей приходится улавливать огромную массу фотонов, и потому каждый рецептор отвечает за свою крошечную точку в общей картине, обеспечивая ей высокую степень разрешения. Ночью зрительная система работает совсем иначе. Фотонов, которые требуется улавливать, мало, поэтому на первый план выходит задача определить, хотя и с малым пространственным разрешением, что где-то тут располагается некий объект. И потому ночью фоторецепторы меняют детали своих внутренних молекулярных каскадов и объединяют усилия. В таких условиях на распознавание близлежащих объектов тратится больше времени, но рецепторы в совокупности способны проявлять большую световую чувствительность<sup>12</sup>. Такая сложносочиненная стратегия позволяет сетчатке действовать в разных режимах, когда уровень освещенности возрастает или снижается. При ярком свете зрительная система обеспечивает высокую

степень пространственного разрешения; в темноте фоторецепторы объединяют силы, чтобы улучшить шансы улавливать скучные фотоны, и в результате зрение становится гораздо чувствительнее к тусклому свету, зато уменьшается четкость изображения. Система прикладывает титанические усилия, чтобы перевести себя в положение, при котором она способна максимизировать поступающую информацию. В изобилии ли фотоны или их всего ничего, сетчатка оптимизируется, чтобы улавливать данные. Днем она собирает очень детальную информацию, так что и зайца в дали полей заметит, а в сумерки ее чувствительность повышается, чтобы хотя бы в общих чертах ухватить все, что поблизости, например смутные очертания подкрадывающегося под покровом темноты ягуара. Матушка-природа придумала не только сам глаз, но и способ на ходу подстраивать под те или иные условия схему его нейронной сети, чтобы зрение в разных контекстах работало по-разному ради наилучшего применения доступного инструментария. Это чистый инфотропизм.

## Подстройка под ожидание неожидаемого

Подобно тому как растения тянутся к свету, а бактерии — к кусочку сахара, мозг стремится к информации. Он старается непрерывно перенастраиваться, чтобы максимизировать объем данных, извлекаемых из окружающего мира. Ради этого мозг выстраивает внутреннюю модель внешнего мира, которая отражает его ожидания. Если мир ведет себя предсказуемо, мозг экономит энергию. Помните, в главе 1 мы обсуждали футболистов: у любителя во время матча отмечается высокая мозговая активность, тогда как у профессионала — очень малая. Причина в том, что у профессионала предвидения относительно его реальности (футбола) уже вплавлены непосредственно в нейронную сеть мозга, а у любителя подобных предвидений еще не сложилось, он пока только сilitся составить сколько-нибудь вразумительный прогноз.

Мозг по большому счету есть не что иное, как прогностическая машина, и именно стремление к точным прогнозам служит движущей силой его постоянного изменения. Создавая модель состояния мира, мозг настраивается, чтобы формировать верные ожидания и тем самым максимально обострять чувствительность ко всему неожиданному.

И вот теперь, с учетом уже полученных знаний о мозге, мы готовы изучить следующий вопрос: как все эти процессы протекают на уровне мозговых клеток?

# ГЛАВА 8

## БАЛАНСИРУЯ НА ГРАНИ ПЕРЕМЕН

Представьте, что вы космический пришелец и вас угораздило явиться на планету Земля в октябре 1962 года — в самый разгар Карибского кризиса. Вам как непосвященному простительно считать, что ничего существенного в этом незнакомом мире не происходит. Ваши выпущенные инопланетные глаза-окуляры не замечают, чтобы Соединенные Штаты Америки предпринимали что-то особенное, как ничего подобного не предпринимают ни Советский Союз, ни Куба. Деликатно прикрывая зеленою лапкой скучливый зевок, вы, надо думать, делаете вывод, что политическая система на этой планете лишена драйва и апатична, а может, и вовсе закостенела.

Вам, верно, и в голову не придет, что единственная причина всеобщего бездействия в том и состоит, что противоборствующие силы достигли абсолютного взаимного равновесия. Напряжение зашкаливает, стороны уже взаимно нацелили свои ядерные ракеты и привели вооруженные силы в полную боевую готовность.

Хотя аналогию не так-то просто разглядеть, но мозг пребывает в таком же положении. Очень может быть, что его карты неизменны потому, что противовесы абсолютно сбалансираны. Мозг только создает иллюзию безмятежности, однако принципы конкуренции удерживают его на тонкой, как волосок, грани перемен. Не будем обольщаться его внешним спокойствием: нейронные сети мозга только с виду безмятежны, и лишь потому, что все его области замерли в вечном противоборстве холодной войны, напряжены и готовы жестко соперничать за будущий передел границ внутреннего «глобуса».

### Когда территория исчезает

Два государства — Республика Гаити и Доминиканская Республика — делят между собой территорию острова Гаити в Карибском море. Задумаемся, что случилось бы, если бы на Доминикану обрушился

сокрушительный удар цунами и вмиг превратил всю ее территорию в непригодную для жизни. Вариант номер один: Доминиканская Республика исчезла бы с карты мира, а Республика Гаити продолжила бы обычную жизнь. Но есть и второй вариант: гаитяне всей страной ужимаются, отодвигаются на сколько-то сотен километров западнее, а освободившуюся часть своей территории великодушно отдают под поселение доминиканцам (рис. 8.1). В этом случае благодаря соседской щедрости оба государства будут гармонично уживаться в тесноте, но не в обиде.



*Рис. 8.1. Если подобный катаклизм произойдет в реальности, гаитянам придется сильно потесниться*

Вернемся к мозгу: что будет, если болезнь, хирургическая операция или черепно-мозговая травма приведет к сокращению доступной мозговой территории? Как и в случае со странами-соседями, здесь также возможны два варианта: мозг устранит часть своей карты, отображавшей утраченную мозговую ткань, или ужмет исходную карту, выделив всем областям участки поменьше.

Чтобы разобраться, по какому варианту пойдут события, обратимся к истории маленькой девочки по имени... ну, скажем, Алиса. В три с половиной года у нее начались легкие приступы, и родители отвезли дочку в больницу, где ей провели сканирование мозга. К великому удивлению врачей, а также всего медицинского сообщества, выяснилось, что девочка появилась на свет только с одним полушарием мозга — левым. Это редкая аномалия, при которой правая половина мозга отсутствует<sup>1</sup>.

Но вот сюрприз: детство у Алисы было самое обычное и вполне нормальное. Как ни поразительно, странная прихоть развития не повредила таких способностей, как координация глаз и движения рук. Приступы у нее случались, но их удавалось купировать при помощи лекарств.

## Живой мозг

И вскоре единственным, в чем выражалось отсутствие правого полушария, остались нарушения мелкой моторики левой руки.

Врожденная аномалия Алисы дает нам шанс ответить на фундаментальный вопрос: что случается с нейронными связями, в норме представленными в обоих полушариях, когда в наличии остается только одно?

Но для начала проследим, как информация в обычном случае поступает в мозг от левого глаза индивида. Нервные волокна левой половины сетчатки передают данные в заднюю часть левого участка зрительной коры. С этим у Алисы все в порядке, поскольку левое полушарие у нее в наличии. А информация от правой половины сетчатки в норме пересекает срединную линию и поступает в заднюю часть правого полушария. Но у Алисы его нет — куда тогда идут нервные волокна (рис. 8.2)?

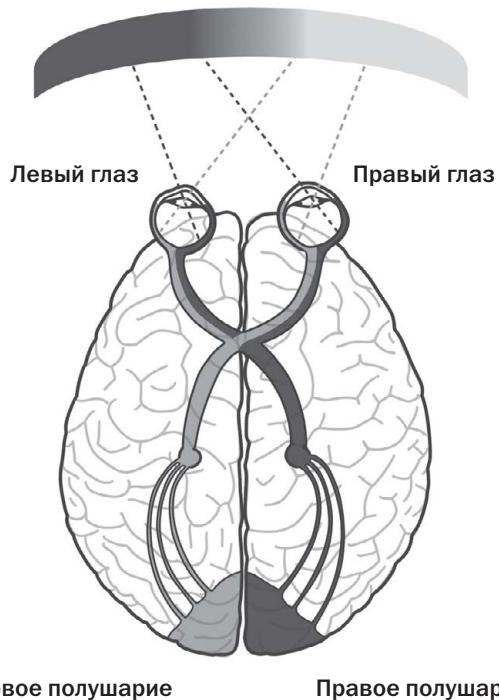
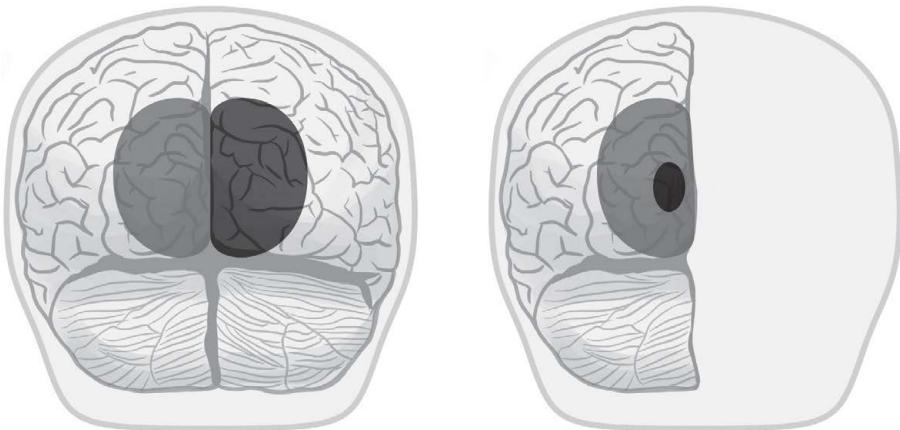


Рис. 8.2. В норме левая часть мира представлена в правой половине мозга.  
Но если у Алисы правое полушарие отсутствует, то куда идут  
соответствующие нервные волокна?

И вот вам восхитительный пример живой нейронной сети, о котором в предшествующие десятилетия мы и не подозревали: нервные волокна, передающие сигналы от обоих зрительных полей, подключились

к левому полушарию. И у Алисы зрительное поле целиком представлено на единственной доступной кортикальной территории (рис. 8.3). Точно так же гаитяне поделились своими владениями с пострадавшими от цунами доминиканцами.



*Рис. 8.3. Зрительная кора располагается в задней части мозга. Слева: нормальный мозг. На сером фоне представлено правое поле зрения (правая сторона видимого мира), а черным фоном помечено расположение левого поля зрения. Справа: зрительная система Алисы перенесла свою нейронную сеть, чтобы и левое, и правое поля были представлены в единственном существующем полушарии*

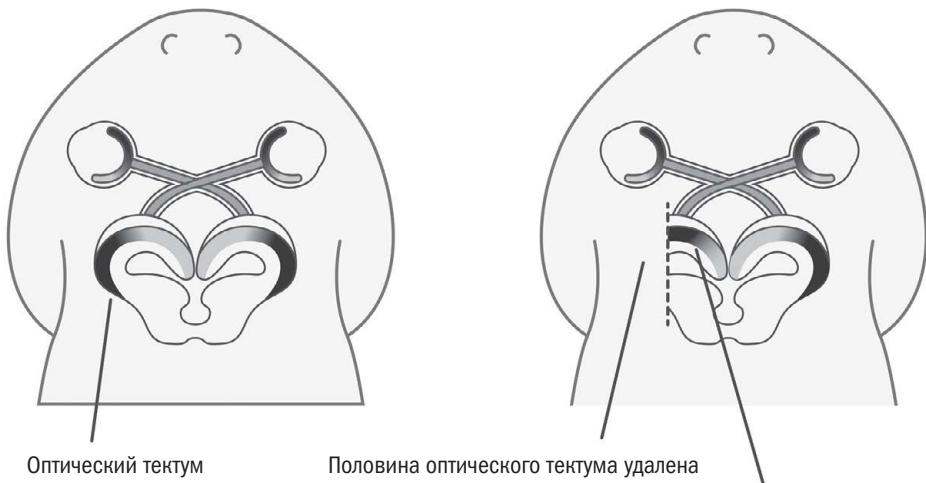
Тот факт, что у Алисы хорошее зрение и в норме координация в системе «глаз — рука», свидетельствует еще об одном удивительном явлении: даже притом что на первых этапах развития зрительная система работала не по штатной схеме, окружающие ее области без труда сообразили, как пользоваться необычной картой мозга. Иными словами, чтобы остальной мозг функционировал нормально, зрительной коре Алисы не требовалось выстраиваться согласно нормальному генетическому плану. В согласии со всем тем, что мы наблюдаем на протяжении этой книги, генетика Алисы не создала хрупкую систему, которая выйдет из строя при малейшем отклонении от заданного направления. Напротив, она распаковала живую сеть, которая в любом случае сама придумает, как обеспечить девочке зрение.

Если у Алисы правое полушарие отсутствует от рождения, то у Мэтью одно полушарие по показаниям удалили хирургическим путем (см. главу 1). Он слегка прихрамывает, а в остальном способен вести самостоятельную жизнь без опеки и помощи. Как и у Алисы, у Мэтью оставшееся полушарие сообразило, что делать: ткань мозга перестроилась, чтобы

## Живой мозг

поддерживать обычную работу даже при радикальных изменениях. И у Алисы, и у Мэтью карты мозга трансформировались таким образом, чтобы уложиться в половину прежде занимаемой территории, сохранив в целости взаимосвязи, задачи и функции.

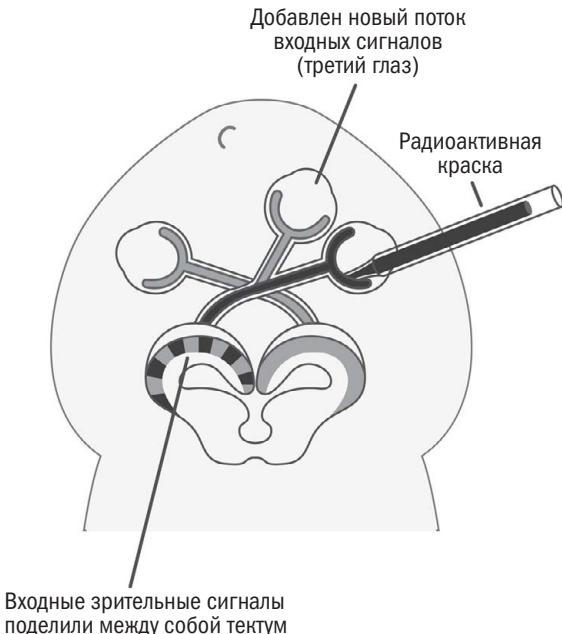
Как происходит такая радикальная перестройка? Первые подсказки дала обыкновенная лягушка, у которой зрительная система устроена проще, чем у человека. Нервные волокна от ее глаза проходят в область, называемую *оптическим тектумом* (в грубом приближении оптический тектум более или менее подобен первичной зрительной коре у млекопитающих), — от правого глаза в левый тектум, от левого соответственно в правый. При этом нервные волокна соблюдают порядок: те, что идут от верхней части глаза, входят в верхнюю часть тектума, а идущие от левой части глаза — в левую. Получается, что каждому выходящему из глаза нервному волокну заранее предписан свой адрес доступа в тектум. А что произойдет, если часть тектума устраниТЬ на той стадии развития, когда нервные волокна еще не дотянулись до него? Ответ: то же, что и в мозге Алисы, — вся карта зрительного поля — *ретинотопическая карта* — развернется на меньшей целевой территории. И выглядеть будет нормально, как ей и полагается<sup>2</sup>. Просто она несколько спрессуется — подобно карте сердобольной Республики Гаити после того, как цунами разорило восточную часть острова (рис. 8.4).



Ретинотопическая карта сжалась

Рис. 8.4. Сжатие под соответствие уменьшившейся территории. Слева: нормальная проекция сетчатки в оптический тектум. Справа: после удаления половины тектума ретинотопическая карта ужимается, чтобы уместиться в меньшую территорию

Теперь поднимем эксперимент на следующий уровень: что будет, если головастику справа или слева трансплантировать дополнительный глаз? В этом случае непредусмотренные волокна зрительного нерва должны будут присоседиться в тектуме к штатным волокнам, идущим от двух глаз. В результате глаза (два положенных генетикой и один лишний) разделят территорию на чередующиеся полосы и каждый набор полос будет содержать полную карту глаза<sup>3</sup>. И снова мы видим, что входящие нервные волокна используют пространство, имеющееся в наличии (рис. 8.5). Это сродни тому, что какое-то новое государство нахально вторгнется на остров Гаити, а граждане республики (вот добряки!) согласятся выделить ему жизненное пространство — полосами, чередуя свои владения с территорией, отданной пришельцам<sup>4</sup>. Этакая чересполосица!



*Рис. 8.5. При трансплантации третьего глаза тектум выделяет дополнительному потоку сигналов место в виде полос, перемежающихся с полосами, которые принимают сигналы от «родных» глаз*

Подобные эксперименты демонстрируют способность карт мозга при необходимости ужиматься и разделять территорию. А будет ли карта растягиваться, если обнаружится дополнительная свободная область? В целях исследования вопроса ученые удалили в одном глазу лягушки

## Живой мозг

половину сетчатки, и теперь только половина нормального количества оптических нервных волокон поступает в нормальных размеров терриорию оптического тектума. В этом случае карта (теперь кодирующая только половину зрительного поля) расширяется, чтобы использовать весь тектум (рис. 8.6)<sup>5</sup>.

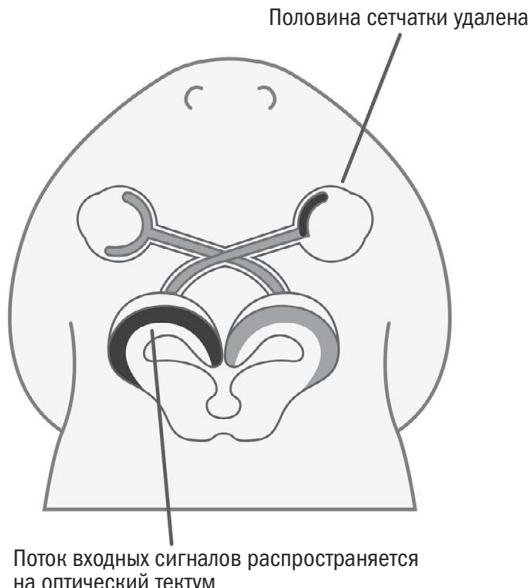


Рис. 8.6. Когда в тектум поступает лишь половина ретинальных волокон, карта растягивается

Опираясь на примеры Алисы, Мэтью и лабораторных лягушек, можно сделать следующий вывод: нейронные карты не предопределены генетической комиссией по территориальному планированию. Наоборот, заполняется и используется вся территория, имеющаяся в наличии.

На это свойство динамической перестройки мы возлагаем надежды, если мозг получил повреждения в результате инсульта. Первоначальный отек через некоторое время спадает, и тогда-то мозг всерьез берется за дело. Крупные кортикальные перестройки могут происходить в течение месяцев или лет, и утраченные функции в какой-то момент восстанавливаются. Подобные явления часто наблюдаются после утраты речи. У большинства людей речевой центр располагается в левом полушарии, и после левостороннего инсульта пациент утрачивает способность выговаривать или понимать слова. Однако через какое-то время речевая функция начинает восстанавливаться — не потому, что необратимо

поврежденная мозговая ткань в левом полушарии исцеляется сама собой, а потому, что эта работа передается правому полушарию. Как следует из одного отчета, у двоих пациентов после инсульта левого полушария нарушилась функция речи, но потом частично восстановилась. Однако позже обоих поразил инсульт правого полушария (вот невезение!), после которого восстановившаяся было функция речи ухудшилась, и это подтверждает, что данная функция была передана из пораженного левого полушария в тогда еще здоровое правое<sup>6</sup>.

Таким образом, мы видим, что карты мозга растягиваются, ужимаются и перемещают свои функции. Но откуда они знают, как это сделать? Для ответа нам придется еще немного приблизить нейронные чащобы.

## Как равномерно распределить наркоторговцев

Я вырос в городе Альбукерке. Как и в любом другом городе, там жили и работали врачи, адвокаты, учителя и инженеры — и, кроме того, как всем известно из телесериала «Во все тяжкие», обретались у нас и наркоторговцы. Подрастая, я все больше дивился, как эти нехорошие люди умудряются распределять между собой территорию города. В конце концов, не только в бедных кварталах они промышляли (хотя полицейский контроль там был строже всего); напротив, торговцы дурью пролезли во все городские углы и закоулки, причем у каждого «на балансе» имелись свои несколько кварталов, куда остальные не совались.

Так как же они определяли, кому какую территорию окучивать? На сей счет имеются две возможности.

Первая: градоправители Альбукерке созвали съезд наркоторговцев, рассадили всю гоп-компанию на раскладных стульях в здании муниципалитета и давай делить городскую территорию честно и справедливо. Назовем этот подход инициативой сверху.

Альтернативная возможность — инициатива снизу. Предположим, что между наркодилерами бушевала жесткая конкуренция и ставки были очень высоки. При таком раскладе каждый наркодилер довольно быстро сообразит, что способен плотно контролировать только определенный район. Ясно, что там бы они орудовали кто во что горазд, при том что их аппетиты сдерживали бы действия конкурентов в соседних районах, и в какой-то момент дилеры обнаружили бы, что естественным образом распределились по всей городской территории.

## Живой мозг

Какие последствия возымел бы раздел территории по инициативе снизу? Предположим, что часть Альбукерке после торнадо лежит в руинах. Что тогда произойдет? Когда город немного оправится, наркоторговцы смекнут, как ужать свои территории и потесниться, чтобы сократившихся «деловых угодий» хватило на всех. Никто ведь не спустит им сверху указаний, что, поскольку территория конкурентов сократилась, надлежит поделиться своими владениями с пострадавшими.

Возьмем противоположную возможность: площадь города внезапно удвоилась. В этом случае мы обнаружим, что дилеры распространились на свободные территории, — так сказать, заполнили вакuum, — обернув себе на пользу прибыток угодий и ослабшую конкуренцию. И снова все произойдет без директивы сверху.

Высокоуровневые паттерны городской территории возникают вследствие конкуренции на самом низовом уровне — среди индивидов. Любой наркодилер желает иметь свою долю бизнеса. У каждого есть близкие, которых надо содержать, аренда, которую следует оплачивать, а может, и мечта о новом автомобиле — и потому он беспрестанно борется за свою нишу. Гибко-подвижная городская карта распределения наркоторговцев есть неумышленное следствие индивидуального поведения, а совсем не спланированная городскими властями схема.

Теперь вернемся к мозгу. Возьмите любой учебник по нейробиологии: вы обязательно найдете в нем информацию о передаче нервных импульсов, то есть высвобождении из нейрона небольшого количества особого вещества — нейромедиатора. Нейромедиатор химически связывается с рецепторами другой клетки, вызывая короткий всплеск электрической или химической активности. Таким путем нейроны посылают сигналы друг другу.

Давайте рассмотрим клеточное взаимодействие в другом свете. В микроскопическом царстве вокруг нас одноклеточные создания вырабатывают особые химические вещества. Но они несут вовсе не дружественные послания; напротив, это защитные механизмы, предупредительные выстрелы в воздух. Попробуем представить миллиарды клеток мозга в виде миллиардов одноклеточных организмов. Хотя обычно мы исходим из того, что нейроны благополучно сотрудничают, мы можем воспринимать их как заклятых врагов, беспрерывно воюющих друг с другом. И они вовсе не передают один другому информацию, а злобно плюются друг в дружку. Через эту призму активность мозговой ткани представлена перед нами как конкуренция между миллиардами самостоятельных агентов, каждый из которых отчаянно сражается за ресурсы и изо всех

сил пытается выжить. И каждый, совсем как наркоторговцы в Альбукерке, эгоистичен.

При такой интерпретации ряд экспериментальных открытий с легкостью находит объяснение. Например, в начале 1960-х годов Дэвид Хьюбел и Торстен Визель\* показали, что перемежающиеся полосы в зрительной коре млекопитающих принимают сигналы либо от левого глаза, либо от правого. В норме каждый глаз контролирует по равной доле территории. Но если на раннем этапе развития одному глазу перекрыть зрение, более мощные входные сигналы от другого начинают захватывать большую площадь. Иными словами, ретинотопические карты в зрительной коре под влиянием опыта могут кардинально меняться: входные сигналы от сильного глазадерживаются и усиливаются, тогда как входные сигналы от закрытого глаза слабеют и в конечном счете угасают<sup>7</sup>. В подобных экспериментах демонстрируются два момента. Во-первых, эти карты не являются чисто врожденными. Во-вторых, удержать территорию возможно только при постоянной активности. А по мере ослабления входных сигналов нейроны меняют свои связи до тех пор, пока не найдут место, где происходит действие.

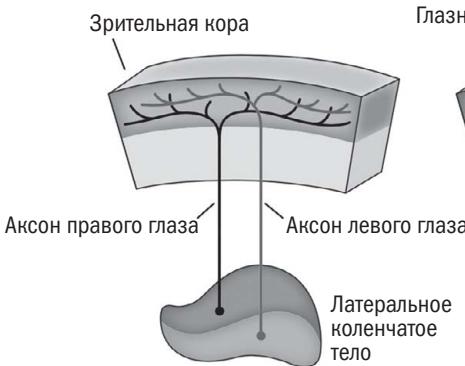
Эти открытия подсказывают нам, как помочь детям с косоглазием. Ребенок с врожденным расходящимся или сходящимся косоглазием в конце концов теряет зрение в меньшем используемом глазу. Однако корень зла кроется не в самом глазу, а в зрительной коре. Поскольку один глаз доминирует, он побивает в конкуренции косящий глаз, забирая себе больше кортикальной территории в задней части мозга. В этом случае следует хирургически скорректировать косящий глаз, а затем закрыть плотной накладкой здоровый (рис. 8.7). Таким путем мы дадим слабому глазу шанс вернуть утраченную кортикальную территорию<sup>8</sup>. Как только баланс занимаемых каждым глазом территорий восстанавливается, накладку снимают, и оба глаза видят одинаково хорошо.

Этот способ лечения основан на знании, что с самого рождения организма нейроны непрерывно конкурируют. Вспомним схему структурной организации тела гомункулуса. В главе 3 мы столкнулись с загадкой, откуда мозгу знать (не забываем, что он заключен в потемках под сводами черепа), как выглядит вверенное ему тело. Изменения в его строении наталкивают на вывод, что мозг рисует карту тела, опираясь на простые правила.

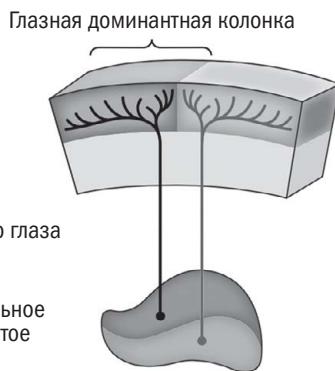
\* Дэвид Хьюбел (1926–2013) — канадский и американский нейрофизиолог; Торстен Визель (р. 1924) — шведский нейробиолог и нейрофизиолог.� Laureates of the Nobel Prize in Physiology or Medicine in 1981 for “their discoveries concerning principles of function in the visual system”. Prim. red.

## Живой мозг

(а) Котенок возрастом 15 дней



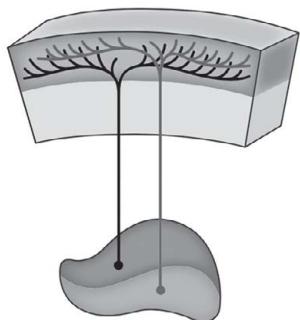
(б) Нормальное развитие зрительной системы



Аксоны, передающие зрительную информацию от таламуса, первоначально широко разветвляются по зрительной коре

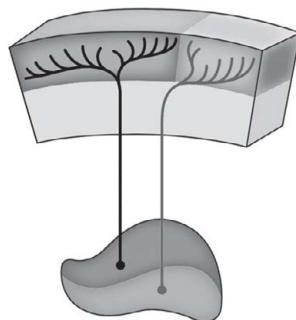
Аксоны разделяются на отдельные для каждого глаза участки в соответствии с паттернами сопряженной активности

(в) Входные сигналы заблокированы



Если активность в сетчатке заблокирована, кортикальные аксоны не разделяются и их разветвления по-прежнему частично перекрывают

(г) Один глаз закрыт накладкой



Когда один глаз закрывают накладкой, территория, занятая нервыми волокнами, передающими информацию от действующего глаза, расширяется

*Рис. 8.7: (а) У совсем молодого принимающий слой первичной зрительной коры получает одинаковые сигналы от левого и правого глаза. (б) По мере взросления животного нейронные цепочки, образуемые обоими глазами, начинают занимать чередующиеся области. (в) Если перекрыть поступление света в оба глаза, нервные волокна, передающие информацию от левого и правого глаза, разделяться не будут. (г) Если перекрыт доступ света только в один глаз, входные сигналы от него постепенно сокращаются, тогда как входные сигналы от действующего глаза захватывают всё большую территорию*

Иными словами, карта естественным образом получается из взаимодействия тела с миром, притом что прилежащие части тела отгораживают себе соседние представительства в мозге<sup>9</sup>. Данный процесс, как в случаях с наркодилерами и врожденным косоглазием, определяется конкуренцией. И по этой причине сразу после потери конечности (скажем, руки у адмирала Нельсона) соседние представительства занимают освободившееся пространство. Удержание кортикальной территории требует постоянного притока входных сигналов к отдельным нейронам: когда сила сигналов затухает, нейроны норовят переподключиться туда, где сигналы из внешнего мира не иссякают.

По этой же, кстати сказать, причине гомункулус имеет такой чудной вид. У него огромные пальцы рук, губы и гениталии при миниатюрных туловище и ногах (рис. 8.8). Это результат все той же конкуренции: в пальцах, губах и гениталиях густота рецепторов гораздо выше, чем в менее чувствительных частях тела, например в бедрах и туловище. Участки тела, от которых мозг получает львиную долю входящей информации, удостаиваются наибольшего кортикального представительства.

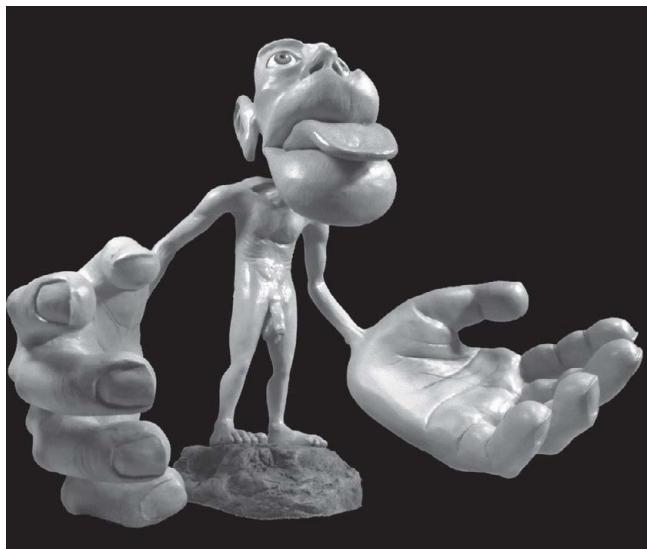


Рис. 8.8. Уродец гомункулус

Таким образом, систему правильно представлять так: на низовом уровне процветает непрерывная конкуренция, и в результате на более высоких уровнях обрисовываются кортикальные владения

(расширяющиеся, сжимающиеся, совместно используемые). И поскольку локальные войны бушуют на протяжении всей жизни организма, карты мозга беспрестанно перерисовываются. Все это происходит потому, что каждый нейрон вынужден отвечать на тот же вызов, что и городской наркоторговец: отыскать свободную нишу и всю жизнь напролет защищать ее от соседских посягательств. Нейроны воюют в мозге за кортикальную территорию не на жизнь, а на смерть: каждый нейрон на протяжении своего существования борется за ресурсы, чтобы гарантировать себе выживание. А за какие именно ресурсы конкурируют нейроны? С наркоторговцами в этом смысле все ясно: ими движет жажда денег. А каков эквивалент денег для нейронов?

\*\*\*

В 1941 году молодая итальянка Рита Леви-Монтальчини бежала из родного Турина и поселилась в сельской глухи, скрываясь от немцев и итальянцев: она была еврейкой, и, когда ее страна заключила союз с нацистами, над девушкой нависла смертельная угроза. Нейробиолог по образованию, Рита устроила в своем убежище маленькую лабораторию и принялась изучать, как развиваются конечности у эмбрионов цыпленка. Исследования привели ее к открытию фактора роста нервной ткани, за что в 1986 году Рита Леви-Монтальчини получила Нобелевскую премию.

Фактор роста нервов стал первым из открытых в семействе химических соединений, называемых нейротропинами, которые поддерживают жизнеспособность нейронов<sup>10</sup>. Эти белки, выделяемые клетками — мишениями нейронов, есть валюта, за которую конкурируют нейроны и синапсы. Нейротропины стимулируют нейроны создавать и стабилизировать связи. Нейроны-счастливчики, успешно добывающие факторы роста, благоденствуют. Нейроны-неудачники повсюду протягивают свои отростки и, если их попытки безуспешны, в конце концов умирают.

Помимо поисков вознаграждения в виде нейротропинов у нейронов имеется еще одна забота — избегать опасного воздействия токсичных факторов. Например, синаптотоксины уничтожают существующие синапсы<sup>11</sup>, и аксоны наперегонки стараются избежать их кары сохранением активности: стоит ей упасть ниже порогового уровня — и конец, их песенка спета<sup>12</sup>.

Таким путем многослойный язык притягивающих и отталкивающих молекул обеспечивает нейронам обратную связь, опираясь на которую

они определяют, стоит ли сохранять свои позиции и расширяться или же надо ужаться, отправляться в другие места, а то и самоустраниться во имя общего блага.

\*\*\*

Параллельно с факторами на уровне отдельных нейронов еще одно свойство более высокого порядка определяет, будет ли вся система гибко-подвижной или закоснелой. Существуют два типа нейронов: одни передают сигналы, стимулирующие соседние нейроны (возбуждающие), другие — сигналы, которые соседей расхолаживают (тормозящие). Нейроны двух типов переплетаются в нейронных сетях, их совокупное действие определяет степень гибкости системы. Если торможения слишком много, нейроны не могут адекватно конкурировать и изменений в системе больше не будет. Если торможения слишком мало, конкуренция становится чрезмерно сильной и победитель не может проявиться. Хорошо откалиброванная, гибкая система требует баланса между торможением и возбуждением; нейроны могут соревноваться достаточно, не слишком мало и не слишком много. Если конкуренция ослабевает, система застывает. Если конкуренция свирепствует, победители не выявляются и, соответственно, не могут verwходить.

В качестве метафоры сравним Северную Корею и Венесуэлу. В Северной Корее режим настолько жестко подавляет любую инициативу, что народ не может сделать ничего, что не было бы сначала одобрено правительством. В Венесуэле, наоборот, режим столь мягкий, что наркокартели, мафия и представители преступного мира обнаглели до предела. В обоих случаях о процветании и речи нет: в Северной Корее — из-за чрезмерного подавления, в Венесуэле — из-за чрезмерного попустительства. В масштабах всего мира наиболее преуспевающие страны поддерживают тонкий баланс между чрезмерной уступчивостью и чрезмерной жесткостью. В этом смысле очень полезны двухпартийные системы, и в нашем контексте мы рассмотрим консервативную и либеральную идеи как аналогию двух конкурирующих типов нейропередач — возбуждающей и тормозящей. В реальности одна из партий обычно доминирует, но очень слабо. Президент представляет одну партию, а большинство в конгрессе обычно принадлежит другой. Хотя принято сетовать на проистекающие от двухпартийной политики нескончаемые дебаты, она идеальна для осуществления полезных перемен. И наоборот, тотальное господство одной партии ведет к захвату системы, что в историческом плане оборачивается для народа неисчислимыми

бедами<sup>13</sup>. Магию положительного баланса как в мозге, так и в правительствах рождают взаимоуравновешивающие силы: только таким путем можно поддерживать комбинированную, сбалансированную и готовую к переменам систему.

## Как нейроны расширяют свою социальную сеть

Как мы видели выше, перемены в мозге могут случаться очень быстро — за какой-нибудь час. Каким образом ему удается так быстро производить столь крупные трансформации?

Помните испытуемых с плотно завязанными глазами, зрительная кора которых уже через час начинала реагировать на тактильные ощущения (см. главу 3)? Чтобы новые синапсы от осозательной и слуховой областей проросли в первичную зрительную кору, часа слишком мало, да и экспериментальные наблюдения указывают на изначальное присутствие этих связей в мозге<sup>14</sup>. В самом деле, многие нейронные соединения уже существуют, но настолько подавлены (ингибиированы), что их присутствие не несет никаких функций. Если их активировать, они подадут голос<sup>15</sup>.

Для аналогии представьте, что ваш круг знакомых понес тяжелые потери. На недавней вечеринке вспыхнула безобразная ссора (ваши гости распоясились не меньше вас), и вы насмерть переругались со всеми самыми близкими друзьями. Привычный приток общения внезапно обмелел, что побудило вас откликнуться на сигналы от менее близких приятелей, никогда прежде не имевших шанса полностью завладеть вашим вниманием. Раньше их голоса тонули в гомоне тесных отношений с закадычными друзьями, а теперь вы слышите этих отдаленных знакомцев и начинаете заполнять ими вакuum своей социальной жизни, культивируя и усиливая слабые дружеские связи.

Приведенная аналогия должна подсказать вам, что механизм пробуждения подспудно существующих связей направлен на то, чтобы устраниТЬ ранее подавлявшие их сильные связи. Если вернуться к терминам неврологии, то предыдущие связи создавали латеральное торможение, то есть подавляли активность ближайших соседей<sup>16</sup>. Когда первоначальные входные сигналы затихают (даже на короткое время, скажем при анестезии кисти руки или из-за повязки на глазах), перемены наступают быстро. Иногда — из-за изменений в коре, в других случаях — от

растормаживания уже существующих соседних связей между таламусом и корой<sup>17</sup>. Иными словами, в результате растормаживания широко представленные, но до времени спящие отростки нейронов становятся функционально работоспособными.

Выявлять такие соединения возможно только потому, что мозг наделен избыточным количеством перекрестных связей. При рождении избыточность высока, но с возрастом снижается. Например, давайте проверим, как действует на индивида громкий зуммер, а предварительно поместим ему на голову электроды (метод электроэнцефалографии), чтобы измерить реакцию мозга. У взрослого здорового человека зуммер спровоцирует электрический ответ, который можно измерить непосредственно в слуховой коре, при этом в зрительной коре зафиксирована слабая реакция или вообще никакой реакции не последует. А теперь сравним это с реакцией полугодовалого младенца: она будет примерно одинаковой силы и в слуховой, и в зрительной коре. Знаете почему? Потому что избыточность нейронных связей в мозге младенца означает, что слуховая кора мало отличается от зрительной<sup>18</sup>. В возрасте между шестью месяцами и тремя годами сила измеримой реакции на звуковой сигнал в зрительной коре постепенно снижается. Перегруженный связями в начале существования мозг со временем обрезает лишние. Однако первоначальные перекрестные связи исчезают не полностью. Даже во взрослом мозге первичные слуховые нервные волокна всё еще напрямую подключены к первичной зрительной коре, и наоборот<sup>19</sup>. Перекрестная «прошивка» мозга первичными нервными волокнами позволяет при необходимости оперативно перепрофилировать области коры (перенаправлять потоки входных сигналов на запасные проводящие пути).

Перемены в мозге происходят не только за счет пробуждения спящих нейронных связей. В более длительном временному масштабе мозг применяет другую уловку: отращивает аксоны в новые области, после чего там пышным цветом расцветают нейронные связи<sup>20</sup>. Если вернуться к аналогии с друзьями, то представьте, что вы всё активнее обмениваетесь посланиями с теми знакомыми, с которыми прежде мало общались. Учитывая, что после разрыва с прежними друзьями в вашем «социальном календаре» зияют пустоты, вы охотно принимаете приглашения от неблизких знакомых и открываетесь для новой дружбы, которой раньше не было места в ваших плотных дружеских отношениях. Точно так же обстоят дела и с мозгом: дайте ему достаточно времени, и отрубленные от связей области мозга раскинут ветвистые побеги новых нейронных связей<sup>21</sup>.

Подведем итог: общий принцип реорганизации мозга построен на скрытом присутствии огромного множества спящих связей. В обычном случае они заторможены и более или менее ни на что не влияют. Но при необходимости их можно пробудить. Благодаря этому скрытому резерву мозг способен быстро реагировать на изменения входных сигналов. Вместе с тем количество спящих связей ограничено, и потому для более длительных и широких перемен он применяет другой подход: если окажется, что краткосрочные перемены полезны, то за ними в конечном счете последуют долговременные изменения (образование новых синапсов и аксонов).

Наряду с этими двумя подходами еще один помогает системе формировать себя — смерть.

## Выгоды правильной смерти

Если задуматься, как Микеланджело ваял один из своих скульптурных шедевров, легко представить, что он создавал его из мрамора, скрупулезно, фрагмент за фрагментом, вырезая каждый палец, нос, лоб, струящиеся складки одежды. Но вспомним, что все начиналось с огромной цельной глыбы, и скульптура возникала под его резцом за счет удаления лишнего, а никак не добавления нового. Секрет гениальных творений Микеланджело кроется в его умении разглядеть сокрытые в каждой глыбе мрамора фигуры и открыть их миру.

Такой же принцип применяет мозг для долговременных изменений. Нейроны проживают свои маленькие жизни в беспрерывном поиске правильного места. Они во все стороны выпускают щупальца и, если встречают положительную реакцию, продолжают в том же духе, а сталкиваясь с холодным приемом, стараются попытать счастья с другими нейронами по соседству. Если же получить положительную обратную связь не удается, нейроны в определенный момент понимают, что для них просто нет места в сети.

Существуют два вида гибели клеток. Если клетки не получают питательных веществ (скажем, из-за закупорки артерии ткань лишается притока крови), они умирают неаккуратно — продукты воспаления распространяются наружу и наносят ущерб соседним тканям. Этот патологический процесс называется некроз. Второй вид клеточной смерти — апоптоз: клетки по сути совершают самоубийство — закрывают лавочку, приводят свои дела в порядок и сами себя съедают. Апоптическая смерть клеток не так уж плоха. В сущности, это механизм, посредством

которого нервная система сама себя выстраивает. В процессе эмбрионального развития траектория движения от перепончатой конечности к четко выраженным пальцам обеспечивается отсечением лишних клеток, а не их добавлением. Те же принципы применимы и к построению мозга. В процессе развития организм продуцирует на 50% больше нейронов, чем нужно. Массовое их вымирание — стандартная рабочая процедура.

## Рак – проявление пластичности, при которой что-то пошло не так

Не исключаю, что пути изучения онкологических заболеваний на современном этапе в какой-то момент пересекутся с нашими исследованиями пластичности мозга.

Представлю вам схематичную картинку возникновения рака: в клетке происходит мутация, принуждающая ее снова и снова делиться. При такой бесконтрольной репликации клетки накапливаются, вырастают в опухоль и нарушают работу остальной системы.

В реальности рак гораздо сложнее, чем я описал. В самой опухоли миллиарды клеток конкурируют за выживание, причем раковые клетки бывают очень непохожи друг на друга. Как и клетки мозга, они тоже обречены на вечное соперничество в борьбе за выживание. При ограниченном запасе питательных веществ каждая клетка старается урвать свое, чтобы выжить. При типичном раке мутация клетки дает ей незначительное преимущество в горниле смертельной конкуренции<sup>22</sup>, позволяющее слегка опережать ближайших соседей. Однако как только клетка-мутант реплицируется, ее копии сами вступают в конкурентную борьбу. Возникают новые мутации, носители которых получают новое, более значительное преимущество и в итоге могут конкурировать еще немного успешнее. Таким образом, конкурентная борьба продолжается, развивается, рождает еще более сильных воинов — до тех пор, пока раковая опухоль в конце концов не убьет своего хозяина.

Теперь снова обратимся к мозгу и телу. Мы существа с живой нервной системой. Нейроны в мозге (а в целом все клетки в организме) вечно борются за выживание и иногда в запале борьбы скатываются в патологию. Некоторые мутации в таких обстоятельствах могут обеспечить клетке небольшое преимущество — но только ценой сталкивания всей системы в гибельный водоворот.

Предполагаю, что многоклеточные организмы отыскали эволюционную нишу на тоненькой, как лезвие ножа, грани хаоса в попытке сохранять баланс между конкуренцией, в чем-то приносящей пользу, и конкуренцией, убивающей систему. На мой взгляд, это одно из объяснений колossalного распространения онкологических заболеваний в животном царстве. Например, у большинства млекопитающих вероятность под конец жизни заболеть раком составляет 30%. Представляется, что система на удивление легко может низвергнуться в это состояние.

В излишне конкурентной системе даже крохотное преимущество рискует обернуться катастрофой: оно может усилить конкуренцию за изменения. А система, все элементы которой мирно уживаются, скорее всего, не порождает множественных мутаций — для нее в этом нет необходимости; соответственно, и гибель ей не грозит.

## Сбережение нейронных лесов

Из этой главы мы узнали, как простые правила конкуренции за террииторию позволяют мозгу кодировать свои карты, способные растягиваться и сжиматься. Познакомились с Алисой, которая родилась с одним полушарием мозга, вспомнили Мэтью, которому полушарие удалили хирургическим путем. И у девочки, и у мальчика нервная система перестроились так, чтобы информация от обоих зрительных полей поступала в оставшееся в одиночестве полушарие. Такую возможность мозгу дала конкуренция на уровне синапсов и нейронов, позволившая быстро пробудить уже существующие, но спящие связи, а со временем отрастить новые аксоны и образовать новые синапсы. По ходу дела естественное желание Алисы и Мэтью ходить, бегать, играть в салочки и кататься на велосипеде посыпало мозгу сигналы релевантности, что и побудило мозг каждого реорганизоваться.

Многосложность жизни во влажных экваториальных лесах подсказала мне аналогию с многосложностью жизни, протекающей в нейронных лесах мозга. Мы склонны представлять себе наши 68 млрд нейронов в виде деревьев и кустарников, произрастающих в тесноте, но не в обиде. А вдруг наши нейроны действительно схожи с реальными обитателями леса, беспрестанно борющимися за выживание? Деревья и кустарники перебирают бесчисленные стратегии, чтобы вырасти повыше, пошире или еще каким-то образом обойти конкурентов, потому что все отчаянно стараются дотянуться до живительного солнечного света. Без него они погибают. Нейротропные факторы мы рассматриваем как аналог света

и когда-нибудь сможем понять стратегии нейронов в понятиях конкурентных каверз, которые они друг другу подстраивают.

Как я подчеркивал выше, все, о чем мы только что узнали, коренным образом отличается от подходов к созданию современных технологий. Инженеры и конструкторы с гордым видом толкуют о прозрениях относительно эффективности, КПД, минимальности требований и технической чистоты. Последнее достигается урезанием связей, однако попутно встраивает в конструируемые системы неспособность балансировать на грани хаоса, неготовность к непредвиденному и невозможность быстрой перестройки.

Зато мозг, как мы убедились, всеми этими свойствами обладает, что позволяет нам снова вернуться к вопросу, который пока остается на заднем плане, но уже требует ответа: почему молодой мозг настолько пластичнее зрелого?

# ГЛАВА 9

## ПОЧЕМУ СТАРОГО ПСА ТРУДНЕЕ ОБУЧИТЬ НОВЫМ ТРЮКАМ?

### Рожденный подобным многим

В 1970-х годах психолог из Массачусетского технологического института Ханс-Лукас Тойбер заинтересовался состоянием здоровья ветеранов Второй мировой войны, которые более трех десятков лет назад получили ранения в голову. Тойбер отследил судьбы 520 таких ветеранов. Кто-то из них вполне реабилитировался, у других дела обстояли худо. При обработке исследовательских данных Тойбер вывел значимую переменную, объяснявшую это различие: чем моложе был солдат на момент ранения, тем лучше он восстановился; чем старше — тем более необратимыми оказывались повреждения мозга<sup>1</sup>.

Юный мозг подобен земному шару пять тысяч лет назад, когда разнообразные события обладали способностью двигать его внутренние границы во множестве направлений. Сегодня, по прошествии тысячелетий истории человечества, карта мира со всеми ее границами в целом установилась. Теперь, когда у нас за плечами столетия холодных и горячих войн и сражений, территориальные границы стали неподатливы к переменам. На смену кочевавшим по просторам мира ордам грабителей и конных варваров-завоевателей пришли Организация Объединенных Наций и принципы международного права. Сформировались экономики в странах, основа благосостояния которых — не награбленные сокровища, а информация и накопленный опыт. Более того, ядерное оружие является сдерживающим фактором военных конфликтов. Таким образом, даже при наличии торговых соглашений и дебатов относительно иммиграции межгосударственные границы вряд ли будут меняться. Нации обосновались на своих территориях. Если в прошлом огромные неосвоенные просторы открывали обширные возможности

## Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам?

для локализации границ, то со временем этот потенциал значительно сузился.

Мозг взрослеет подобно планете. За годы приграничных споров нейронные связи становятся все прочнее и жестче. И потому мозговые травмы чрезвычайно опасны для пожилых и значительно менее трагичны для молодежи. Зрелый мозг не может запросто взять и переопределить под новые задачи старые зоны, которые давно очерчены. Зато мозг молодого человека, пребывающий в преддверии будущих территориальных войн, способен без труда перерисовать свои карты.

Вернемся к нашим знакомцам Хаято из Осаки и Уильяму из Пало-Альто. Уже в малом возрасте они могут понимать все звуки человеческого языка. Оба способны и на большее: улавливать нюансы своей культуры, впитывать религиозные убеждения и обучаться правилам социального взаимодействия. Они учатся собирать огромные массивы информации и (в зависимости от поколения, к которому принадлежат) делать это, разворачивая длиннейшие свитки, листая книжные страницы или водя пальцем по миниатюрному прямоугольнику экрана.

Но когда дети взрослеют, все меняется. Сегодня Хаято состоит в конкретной политической партии и вряд ли захочет перейти в другую. Уильям вполне сносно играет на пианино, но не проявляет интереса к скрипке или другому музыкальному инструменту. Хаято любит готовить, и в основе всех его блюд лежат те или иные сочетания четырнадцати привычных для него ингредиентов. Уильям проводит время в интернете, посещая исчезающие малую долю миллиардов доступных сайтов. Хаято считает гольф респектабельной игрой, а другие виды спорта его совсем не привлекают. Уильям живет в восьмимиллионном городе, но у него всего трое близких друзей. Хаято не особенно интересуется наукой — помимо того, чему его научили в школе. В магазине Уильям переберет множество сорочек, пока не найдет такие, какие привык носить, и выберет две, причем всегда одного цвета. Хаято с восьми лет стрижется одинаково.

Эти жизненные траектории подчеркивают общее качество: человеческие детеныши рождаются на свет с немногочисленными врожденными навыками и потрясающей пластичностью, тогда как взрослые уже освоили конкретные навыки за счет гибкости мозга. Налицо компромисс между адаптивностью и эффективностью: по мере того как ваш мозг совершенствует определенные навыки, он все меньше способен освоить какие-то другие.

Вспомним историю о любителе музыки, который воскликнул, что отдал бы целую жизнь, чтобы играть, как великий скрипач Ицхак Перлман,

## Живой мозг

а тот ответил: «Я и отдал» (глава 6). Перлман просто констатировал факт из собственной жизни: хочешь достичь совершенства в одном деле, закрой двери для всех других. Жизнь у вас одна, и дело, которому вы собираетесь посвятить себя, поведет вас своими дорогами, но при этом все остальные пути навсегда останутся нехожеными. Вот почему эпиграфом к этой книге я выбрал одно из моих любимых высказываний Мартина Хайдеггера: «Каждый человек рождается подобным многим, но умирает неповторимым».

Что с точки зрения ваших нейронных сетей означает развить шаблон и привычку? Представим два городка, отстоящих один от другого на несколько километров. Люди, желающие попасть из одного городка в другой, двигаются всеми доступными путями: одни — живописными горными кручами, другие — дорогой вокруг холмов, третья сплавляются по порожистой реке, смельчаки же готовы рискнуть, но сэкономить время и потому пробираются напрямик через дремучие леса. С течением времени накапливается дорожный опыт, и одни маршруты становятся предпочтительнее других. В конечном счете из всех маршрутов выделяется выбранный большинством путешественников и становится общепринятым. Через какое-то время местные власти прокладывают по этому маршруту шоссейные дороги, а спустя несколько десятилетий перестраивают их в автострады. Большое разнообразие вариантов сводится к одному стандартному маршруту.

Аналогично мозг начинает свое жизненное путешествие с множества путей через нейронные сети; со временем выделяются практикуемые чаще всего, привычные пути, отступать от которых чем дальше, тем труднее. Неиспользованные пути истончаются, пока не сойдут на нет. Нейроны, так и не нашедшие себе применения, тихо самоликвидируются. Десятилетия жизненного опыта физически подстраивают мозг под окружающую реальность, и решения, которые вы принимаете, следуют оставшимися, но хорошо накатанными путями. Положительная сторона здесь в выработанной вами способности молниеносно решать проблемы. Отрицательная — вам труднее принимать нетривиальные решения, сложно выпустить на волю буйную фантазию и проявить изобретательность.

Меньшая гибкость более взрослого мозга обусловлена еще одной причиной помимо уменьшения числа альтернативных путей: изменения в нем захватывают лишь небольшие участки. В отличие от взрослого, в детском мозге перемены затрагивают обширные территории. Используя системы трансляции, подобные ацетилхолиновой, младенцы передают сигналы по всему мозгу, что позволяет меняться проводящим

путем и нейронным связям. Мозг ребенка переменчив, он приобретает четкие очертания так же постепенно, как пропадает изображение на полароидном снимке. Взрослый мозг меняется только по чуть-чуть за раз. Большинство нейронных связей в нем сохраняют незыблемость, цепляются за усвоенные знания, и лишь малые участки приобретают гибкость под влиянием подходящей комбинации нейротрансмиттеров<sup>2</sup>. Взрослый мозг подобен художнику-пуантилисту\*, который лишь добавляет оттенок отдельным точкам почти готовой картины.

Если вам любопытно, каково находиться внутри в высшей степени пластиичного детского мозга, замечу, что все мы в детстве переживали это состояние, хотя и не можем помнить его. Так каково это — ощущать себя податливым, словно воск, и при этом способным впитывать массу разнообразных новых впечатлений? Вероятно, вы приблизитесь к этому ощущению, если вспомните моменты, когда ваши осознанность и пластичность включались на полную катушку. Например, путешествуя по необычной, незнакомой вам стране, вы полностью поглощены увиденным, переполнены впечатлениями, неудержимо вбираете новые знания и активнее распределите внимание. А дома вы, наоборот, гораздо менее внимательны и менее восприимчивы, потому что все вокруг знакомо и предсказуемо. Зато во время путешествий ваш взгляд распахнут навстречу неизведанному, вы остро чувствуете новизну и словно возвращаетесь в младенчество<sup>3</sup>.

Отличия детей от взрослых очевидны, при этом с точки зрения нейробиологии переход из детства во взросłość происходит не плавно, а скорее через резко распахнувшуюся дверь: вот она открыта, а теперь захлопнулась. И после этого никакие крупные перемены уже невозможны.

## Сенситивный период

Мы снова возвращаемся к Мэтью, которому удалили одно из полушарий мозга. Такого рода радикальное хирургическое вмешательство (гемисферэктомия) обычно показано детям в возрасте не старше восьми лет. Мэтью тогда было уже шесть, он приближался к предельному для подобных операций возрасту. Ребенку постарше пришлось бы всю жизнь

\* Пуантилизм (фр. pointillisme, букв. «точечность», от фр. *point* — точка) — стилистическое направление в живописи неоимпрессионизма, возникшее во Франции около 1885 года, в основе которого лежит манера письма раздельными мазками точечной или прямоугольной формы. Характеризуется отказом от физического смешения красок ради оптического эффекта (подразумевается «смешение» на сетчатке глаза зрителя). Прим. ред.

подлаживать выполняемые задачи под свою половинку мозга, вместо того чтобы полагаться на его способность самому приспосабливаться к решению любых задач<sup>4</sup>.

Момент, когда дверь захлопывается, можно заметить по менее выраженным изменениям в мозге. Вспомним обделенную родительским вниманием Даниэль, дикарку поневоле, которую обнаружила полиция штата Флорида (глава 2). Проведя все детство взаперти в тесной каморке, не зная ни человеческого слова, ни участия, девочка утратила способности к речи, дальнему зрению и нормальному человеческому общению. Перспективы восстановиться совсем печальны для Даниэль, так как нашли ее слишком поздно и карта мира в ее мозге успела застыть.

Случай Мэтью и Даниэль, хотя и с разных сторон, подтверждают один и тот же тезис: мозг наиболее гибок в начале жизни, пока открыто временное окно, называемое сенситивным, или чувствительным, периодом<sup>5</sup>. Как только этот период проходит, нейронная картография тяжелее поддается переменам.

Как следует из случая Даниэль, детскому мозгу в сенситивный период требуется постоянно слышать человеческую речь. Без этого входного потока данных нейронам никогда не научиться схватывать базовые представления о языке. А что происходит, если ребенок от рождения страдает глухотой, спросите вы. А я отвечу так: если родители не скучая демонстрируют ребенку язык жестов, его мозг образует корректные связи для такой коммуникации. И кроме того, глухой младенец пустит в ход ручонки и будет «лепетать» ими в попытках повторить виденные у родителей знаки речи — точно так же, как лепечет ребенок с нормальным слухом, который слышит вокруг себя человеческую речь и пробует свои голосовые связки<sup>6</sup>. Если малыш получает из внешнего мира входные данные, которые следует уловить и усвоить, он будет делать это — при условии, что поступают они в чувствительный период. Но стоит двери захлопнуться, и все — постигать основы коммуникации поздно.

Таким образом, для развития способности к общению, а также к усвоению нюансов речи, включая акцент, существует определенное временное окно<sup>7</sup>. Например, в речи уже упоминавшейся в главе 1 актрисы Милы Кунис иностранный акцент незаметен, когда она говорит на американском английском, хотя родилась и до семи лет жила на Украине, не зная по-английски ни слова. Противоположный пример — Арнольд Шварценеггер, который с двадцати лет обретается в Голливуде и вращается в американской кинематографической тусовке, однако без всякой надежды изжить австрийский акцент. С точки зрения зрелости мозга он слишком поздно начал разговаривать на английском. В целом, попав

## Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам?

в новую страну в первые семь лет жизни, вы будете говорить на языке этой страны так же бегло, как ее жители, поскольку ваше окно чувствительности к поступающим звукам все еще открыто. Если же вы иммигрировали в возрасте от восьми до десяти лет, вам будет чуть труднее ассилироваться в плане языка, но говорить вы будете почти без акцента. А если вы переехали в другую страну в возрасте больше десяти лет, у вас, как у Арнольда, беглость речи, скорее всего, так и останется уровнем ниже, и к тому же сохранится акцент, выдающий ваше происхождение. Способность усваивать звуковые обычаи другой культуры открыта примерно в первые десять лет жизни.

Выше мы уже видели, как использовать силу принципа конкуренции для выправления врожденного косоглазия: на здоровый глаз поместить накладку, а слабому дать возможность отвоевать оттяпанную сильным глазом кортикальную территорию. Но обратите внимание, что закрывать здоровый глаз имеет смысл только в сенситивный период — до шести лет, а иначе будет поздно: зрение уже никогда не поддается восстановлению<sup>8</sup>. По достижении шести лет грунтовые проселочные дороги в мозге превращаются в заасфальтированные шоссе и никаких перемен уже не допускают.

То же касается слепоты. Как мы уже знаем, наибольший захват зрительной коры соседями-конкурентами наблюдается у слепорожденных, в меньшей степени — у потерявших зрение в раннем детстве, и еще в меньшей — у людей, ослепших в более поздние годы жизни (глава 3). Мозг с большей легкостью обрабатывает входные данные, изменившиеся в более раннем периоде. Этот принцип можно рассматривать и с позиций продуктивности. Чем больше захват зрительной коры, тем лучше индивид способен запоминать списки слов, поскольку прежняя кора теперь частично переключена на улучшение запоминания<sup>9</sup>. Установлено, что способность к запоминанию наиболее развита у незрячих с рождения. Вторыми по силе памяти выступают те, кто лишился зрения в раннем детстве, а самые незначительные успехи наблюдаются у людей, потерявшим зорение в более позднем возрасте<sup>10</sup>. Временной фактор играет здесь большую роль.

Эти знания очень важны хирургам, когда они оценивают возможные варианты лечения. Хирургическое вмешательство с целью устранения закупорки сосудов глаза может привести к разным исходам в зависимости от возраста пациента: те, кто помоложе, способны с легкостью восстанавливать зрительное восприятие, а для пациентов более старшего возраста такой результат нетипичен. Дело в том, что у людей, длительное время лишенных зрения, повторное подключение потока визуальных

данных в затылочную кору в ряде случаев нарушает нормальную работу осязательной и слуховой систем<sup>11</sup>.

Вернемся к эксперименту с подключением зрительных нервов хорька в слуховую кору (глава 4). Хотя визуальная информация поступала в непривычную область, кора нашла способ анализировать эти данные. Однако обратите внимание, что трансформация слуховой коры оказалась неполной: в итоге визуальная нейронная сеть в ней установилась несколько беспорядочнее, чем в зрительной коре, и это указывает на вероятность, что слуховая кора исходно оптимизирована под несколько другой тип входных данных<sup>12</sup>. Возможно, так происходит потому, что способность коры к изменениям уравновешивается по крайней мере некоторой генетической предрасположенностью. Но одинаково вероятно и другое объяснение: на момент экспериментальной хирургической манипуляции в слуховой коре хорька уже накопилось какое-то количество данных об окружающих звуках. Если бы зрительные волокна удалось подсоединить к ней на самой ранней стадии развития (скажем, в утробе, что в настоящее время невозможно), вполне вероятно, что слуховая кора полностью трансформировалась бы в зрительную.

Влияние временных рамок развития обнаружено для всех органов чувств. Помните, как подстраивается карта тела, если индивид теряет палец или когда ребенок начинает обучаться игре на новом музыкальном инструменте? В целом подобные изменения в большей степени происходят в молодом мозге, чем в возрастном. Как Мила Кунис, обязанная своей чистой речью тому, что выучила английский язык в семь лет, так и Ицхак Перлман стал выдающимся скрипачом, потому что с ранних лет держал в руках скрипку. Начни вы играть на скрипке в подростковом возрасте, вам ни за что не удалось бы подняться до уровня выдающегося исполнителя. Даже если вы проявите чудеса усердия и будете репетировать столько же, как и Ицхак Перлман, ваш мозг все равно станет отставать: к моменту вашего первого юношеского пиццикато он уже слишком упрочился, чтобы гибко меняться.

Обретение зрения, речи и скрипичного мастерства определяется нормальным притоком входных данных из мира, и если ребенок, как бедная Даниэль, вовремя не получает их, позже усвоить эту информацию он уже не сможет. Способности обучаться языку, хорошо видеть, эффективно общаться, normally ходить и правильно развивать мозг ограничены во времени детскими годами — после определенного момента эти способности утрачиваются. Мозгу необходимо получать и усваивать должные входные потоки в течение должного временного окна, и тогда в нем выстраиваются наиболее полезные связи.

## Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам?

В результате снижения гибкости мозга на нас сильно влияют события, происходившие в детстве. В качестве любопытного примера рассмотрим корреляцию между ростом человека и размером его заработной платы. В Соединенных Штатах размер заработной платы мужчин увеличивается на 1,8% за каждый дополнительный дюйм\* роста. Самое расхожее объяснение: это результат дискриминации в практике найма — все хотят получить в штат этого высокого парня, потому что он видный и привлекает всеобщее внимание. Выясняется, однако, что причина лежит куда глубже: лучшим индикатором размера будущей зарплаты является рост юноши в 16-летнем возрасте. Какой бы каланчой он потом ни вымахал, ни малейшей роли в его будущем заработке это не сыграет<sup>13</sup>. Как мы это поняли? Может быть, все дело в различиях рациона питания? Нет: когда ученые высчитывали корреляцию зарплаты с ростом в 7 и 11 лет, она оказывалась довольно невысокой. Напротив, именно в подростковом возрасте устанавливается социальный статус, и в итоге то, кем вы станете, очень зависит от того, кем вы были в юношестве. На самом деле, как показывают лонгитюдные исследования тысяч детей до достижения ими взрослого возраста, социально ориентированные профессии, скажем продажи или руководство другими людьми, более всего коррелируют с ростом в юношестве. На другие профессии, например рабочие или творческие, юношеский рост влияет меньше. И, кстати, отношение к вам людей в годы становления в значительной мере определяет вашу манеру поведения в плане самоуважения, уверенности в себе и лидерских качеств.

Вот пример: состояние медиазвезды Опры Уинфри сегодня \$2,7 млрд — и потому немного удивляешься, когда сообщают, что в ней глубоко сидит страх бездомности и безденежья. Но эти опасения связаны с пройденным ею путем, который в конце концов привел ее на вершину успеха. Будущая теледива Опра начинала девчонкой из бедной семьи в штате Миссисипи и была дочерью матери-одиночки, которая родила ее, будучи еще подростком.

Как подметил 2400 лет тому назад Аристотель: «Привычки, выработанные у нас в детстве, не так уж безобидны; скорее, они решают всё».

\*\*\*

Я обратился к метафоре с закрывающейся дверью, чтобы лучше передать суть и смысл такого феномена, как сенситивный период. Теперь мы готовы продолжить нашу аналогию уже на следующем уровне. Эта дверь не единственная — их много.

---

\* Один дюйм равен 2,54 см. Прим. ред.

## Двери закрываются с разной скоростью

В первые дни жизни мозг настолько восприимчив, что иногда попадает впросак. Например, только что вылупившийся из яйца гусенок принимает за мать первое живое существо, которое попадается ему на глаза. В большинстве случаев такая стратегия оправдывает себя, поскольку детеныш обычно первой видит мать, однако при неудачном стечении обстоятельств возникает риск ошибки. В 1930-е годы зоолог Конрад Лоренц легко импринтировал\* на себя гусят — достаточно было оказаться рядом, когда они только-только вылупились из скорлупы и в их мозге еще открыто крохотное окошко пластичности. Запечатлев Лоренца как свою матушку-гусыню, гусята потом повсюду следовали за ним.

Гусятам эта быстро захлопывающаяся дверь позволяет запечатлеть образ матери. Однако позже, когда дверь захлопнется навсегда, они все равно сохранят способность обучаться важным для жизни навыкам: как добраться до водоема, где лучше всего искать пищу и как распознавать отличительные особенности других гусей, которые им встречаются (рис. 9.1).

Для разных задач у мозга предусмотрены разные сенситивные периоды. Не все его области одинаково пластичны в плане первоначальной гибкости и долговечности адаптивных свойств.

Существует ли шаблон, определяющий, какие области мозга утратят пластичность первыми, а какие позже? Рассмотрим случай, когда учёные исследовали изменения в зрительной коре взрослого человека после повреждения сетчатки. Их интересовал вопрос: захватили бы области, прилежащие к зрительной коре, освободившуюся мозговой ткань, и если да, то как быстро бы это произошло? К своему удивлению, исследователи не обнаружили измеримых перемен в зрительной коре: как был ее участок неактивным после травмы, так и остался, соседние области им не завладели<sup>14</sup>. Такой результат, если учитывать историю изучения пластичности мозга, оказался слегка неожиданным, ведь у взрослых соматосенсорная кора, как и моторная, обладает большой гибкостью, что, собственно, и позволяет вам в зрелости научиться летать на дельтаплане или кататься на сноуборде<sup>15</sup>.

\* Импринтинг, или запечатление (англ. imprint — «отпечатывать, запечатлевать») — быстрая и бессознательная фиксация в памяти отличительных признаков родителей, братьев и сестер, пищи, врагов, мест обитания (рождения), карты звездного неба и т. п. Возможен в течение ограниченного по срокам сенситивного периода. Прим. науч. ред.



Рис. 9.1. Конрад Лоренц и его впечатлительные питомцы

Так что же отличает исследования вашего зрения от исследований вашего тела? Почему в первичной зрительной коре паттерны прочно закреплены и не способны меняться после того, как закроется открытое всего несколько лет временное окно пластичности, а соматосенсорная и моторная области сохраняют способность к обучению? Почему 8-летний ребенок с косоглазием необратимо теряет зрение в одном глазу, а 58-летний паралитик способен обучиться управлять механической рукой?

Дело в том, что у разных областей мозга разные сроки и продолжительность пластичности. Одни нейронные сети жестки и неподатливы, а другие очень пластичны и отзывчивы; у одних чувствительный период короток, а у других, наоборот, продолжителен.

Стоит ли за этим разнообразием какой-либо общий принцип? Согласно одной из гипотез различия в продолжительности сенситивных периодов обусловлены различиями в стратегиях обучения, заложенных в разных областях мозга<sup>16</sup>. С этой точки зрения некоторые из них нацелены обучаться на протяжении всей жизни, поскольку их

## Живой мозг

предназначение — кодировать меняющиеся детали в картине внешнего мира. Вспомним пополнение словарного запаса, изучение новых инструкций или узнавание лиц знакомых — все эти задачи требуют сохранять гибкость. Другие области мозга, напротив, участвуют в стабильных связях, таких как построение изображения, движения челюстей при жевании или заучивание общих правил грамматики. Для этих областей важно быстрее и надежнее закрепить связи.

Возникает вопрос: откуда мозгу знать наперед, в каком порядке закреплять те или иные связи? Может быть, этот порядок генетически предопределен? Возможно, в каких-то аспектах да, но я предлагаю другую гипотезу: степень пластичности области мозга отражает, в какой степени переменчивы (или расположены к переменам) во внешнем мире поступающие к ней данные. Если входные данные упорно не меняются, система застывает. Если же они меняются постоянно, система сохраняет гибкость. В итоге первыми закрепляются стабильные данные.

Сравним информацию, которую мозг получает от ушей, с информацией, поступающей от тела. Области, кодирующие базовые звуки мира, например первичная слуховая кора, приобретают резистентность к изменениям. Они быстро упрочиваются. Именно это произошло у младенцев Уильяма и Хаято, когда их мозг закрепил ландшафт возможных звуков. В отличие от слуховой коры, моторная и соматосенсорная, будучи вовлечены в перемещение тела в пространстве, сохраняют больше пластичности, поскольку на протяжении жизни образ тела меняется: вы толстеете, худеете, надеваете ботинки, шлепанцы, встаете на костили, ездите на велосипеде или скутере, прыгаете на батуте. Вот почему взрослый Уильям и взрослый Хаято могут вместе поехать в отпуск и успешно обучиться виндсерфингу. Если статистика поступающих звуков в общем стабильна, то получаемая телом обратная связь от мира меняется постоянно. В итоге первичная слуховая кора «застывает», а области, отвечающие за образ тела, в большей степени сохраняют пластичность.

Давайте поближе рассмотрим одно чувство, например зрение. В зрительных областях нижних уровней, скажем в первичной зрительной коре, нейроны кодируют базовые свойства мира — края, цвета и углы. В отличие от них, выше расположенные зрительные области отвечают за более конкретные свойства, к которым можно отнести пространственную планировку улицы, стильные формы представленной в этом году модели спорткара или расположение приложений на экране вашего мобильника. Информация в нижних уровнях

## Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам?

закрепляется первой, а затем поверх этого фундамента надстраиваются последующие слои. Таким образом, у вас закрепляются представления о том, под какими углами могут быть ориентированы линии в пространстве, но при этом вы можете запомнить лицо новой кинозвездочки. В данной иерархии первыми заучиваются представления на нижних уровнях: они отражают базовые статистические данные о видимом мире, которые вряд ли будут меняться. Эти нижележащие представления сохраняют неизменность, благодаря чему композиции более высокого порядка (которые меняются быстрее) тоже могут быть изучены.

Точно так же, обустраивая библиотеку, вы сначала закладываете основы — расположение книжных полок, десятичную классификацию Дьюи, процедуры выдачи и возврата книг. После этого становится ясно, как поддерживать библиотечный фонд в актуальном состоянии, в том числе расширять предложение самых интересных тематик, списывать устаревшие единицы хранения и постоянно отслеживать выход новых изданий.

Таким образом, нет однозначного ответа на вопрос, сохраняет ли мозг гибкость с возрастом или нет, — все зависит от того, о какой области идет речь. По мере старения пластичность снижается, но в разных областях это происходит разными темпами — резко или постепенно, сообразно функциям, выполняемым данной областью.

Аналогию гипотезе вариативной пластичности можно найти в генетике. При помощи некоторых механизмов, которые ученые пока еще пытаются понять, геном, судя по всему, жестче фиксирует определенные участки нуклеотидных последовательностей, чем другие, надежно ограждая их от мутаций. И наоборот, каким-то другим участкам хромосом изменчивость свойственна больше. Грубо говоря, изменчивость нуклеотидных последовательностей отражает изменчивость различных характеристик мира<sup>17</sup>. Например, гены распределения пигмента кожи изменчивы, потому что индивид, родившийся в высоких или низких географических широтах, должен приспособить свою генетику к интенсивности солнечного излучения и, соответственно, к достаточному поглощению витамина D. Зато гены, кодирующие белки или расщепляющие сахар, стабильны, потому что это жизненно важный и неизменный источник энергии организма. Возможно, в будущих исследованиях удастся оценить вариабельность ментальной, социальной и поведенческой функций в жизни человека и проверить гипотезу о том, что самые гибкие участки нейронной сети мозга отражают наиболее изменчивые элементы жизненной среды.

## Столько лет прошло, а он все еще меняется

Взрослые завидуют детям. Ребенок поразительно быстро обучается другим языкам, способен придумывать фантастические, немыслимо изобретательные подходы к решению проблем и ценить новизну каждого впечатления, когда впервые смотрит в иллюминатор на землю внизу или гладит шелковистую шерстку кролика. В мозге постарше закрытых дверей больше, поэтому ветераны в исследованиях Тойбера чувствовали себя в соответствии с возрастом получения ранения (чем старше они тогда были, тем хуже), а у Шварценеггера сохраняется сильный австрийский акцент. Аналогично: чем старше город, тем сильнее его инфраструктура сопротивляется реконструкции. Риму, например, никак не расправить своих извилистых улиц, чтобы хоть как-то приблизиться к Манхэттену: многие столетия истории слишком глубоко впечатали в лицо Вечного города извины его старинных улиц-морщин. Подобно человеческим существам, города тоже укореняют проторенные в их историческом детстве пути-дороги.

В 1984 году 35-летний физик Аллан Лайтман опубликовал в *The New York Times* короткий очерк под названием «Испарившиеся ожидания» (*Elapsed Expectations*), в котором с горечью признавался, что чувствует, как костенеет его разум:

«У ученых, как и у гимнастов, расцвет гибкости приходится на молодые годы. Ньютона открыл закон гравитации в 20 лет с небольшим, Альберту Эйнштейну было 26, когда он сформулировал принципы специальной теории относительности, а Джеймс Максвелл уже к 35 годам довел до совершенства теорию электромагнитного поля и удалился в свое поместье в сельской глухомани. Когда мне несколько месяцев назад стукнуло 35, я поддался горькому, но неодолимому желанию подытожить свои достижения в физике. К этому возрасту или, может, еще лет через несколько самые творческие свершения обычно завершены и очевидны: ты либо уже наработал научный багаж и использовал его, либо нет».

Сожалениям Лайтмана вторит в своем телевизионном интервью американский физик-теоретик Джеймс Гейтс:

«Есть такая поговорка: старые физики воспринимают новые идеи, когда умирают. И только следующее поколение доводит уже свои новые идеи до расцвета и полностью раскрывает их

## Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам?

плодотворность. Пожилого физика — такого, как я, — переполняют знания и, словно балласт на корабле, только тянут ко дну. Весь этот груз давит. Иногда идея промелькнет неясной тенью вроде феи или призрака, и ты говоришь себе: “Ох, ума не приложу, что это было, но, ясное дело, ничего серьезного”. Бывает такое иногда...»

Мы часто слышим от пожилых людей подобные сожаления. Однако хотя мозг и теряет пластичность с возрастом, но, к счастью, не до конца — кое-что еще остается. Нейронная сеть с ее возможностями изменяться не есть привилегия только молодых мозгов. Перенастройка нейросетей безостановочно продолжается всю жизнь: мы генерируем новые идеи, накапливаем свежую информацию, держим в памяти людей и события. Вон и Рим при всем недостатке гибкости все равно идет вперед, и сегодня он уже не тот, каким был два десятилетия назад: его выдающиеся памятники окружены вышками мобильной связи и множеством интернет-кафе. И пусть любители старины все еще противятся переменам, город тем не менее успешно расширяет узкие места, сообразуясь с новыми обстоятельствами, — так же, как библиотеки обновляют свои фонды, сохраняя в неизменности архитектуру библиотечных основ.

В приведенных выше результатах исследований мы уже видели примеры пластичности взрослого мозга: например, обучение жонглированию, игре на новых музыкальных инструментах, заучивание названий и расположения улиц Лондона. Поразительный пример тому дает и недавнее лонгитюдное исследование сотен католических монахинь, проживающих в монастырях<sup>18</sup>. Сестры дали согласие регулярно проходить тестирование когнитивных функций, использовать свои медицинские данные, а также после смерти предоставить свой мозг для научных исследований. Любопытно, что у некоторых пожилых монахинь при жизни не наблюдалось ни малейших признаков когнитивных нарушений, сестры сохраняли остроту и ясность ума — а между тем при вскрытии обнаруживалось, что болезнь Альцгеймера нанесла мозгу опустошающие разрушения. Проще говоря, нейронные сети физически деградировали, а работоспособность мозга не пострадала. Как это объяснить? Главная причина в том, что сестрам до последних дней приходилось постоянно задействовать силу ума. У каждой имелись неотъемлемые обязанности, не говоря уже о ежедневных бытовых хлопотах, социальной жизни, ссорах и трениях, посиделках, общих обсуждениях и прочих реалиях монастырского уклада. В отличие от

80-летних мирян, монахини не получают пенсии, у них нет привилегии уйти на покой и завалиться на диван перед телевизором. Активная психическая жизнь вынуждала их мозг постоянно перекидывать новые мостики, даже если часть нейронных путей разваливалась. На самом деле — и это изумляет — примерно у трети монахинь обнаружились свойственные болезни Альцгеймера молекулярные патологии, но без ожидаемых в таких случаях симптомов когнитивного упадка. Интенсивная умственная работа даже у очень пожилых людей способствует построению новых нейронных связей<sup>19</sup>.

Таким образом, обучение возможно в любом возрасте. Да, но почему оно замедляется, когда мозг достигает зрелости? Одна из причин состоит в том, что многие распахнутые двери закрылись навсегда. Но можно подойти к проблеме и с других позиций. Вспомним, что изменения в мозге стимулируются различиями между внутренней моделью и событиями во внешнем мире. Следовательно, мозг меняется, только когда снаружи происходит нечто несоответствующее внутренней модели. Чем больше вы живете и чем больше правил осваиваете — начиная с ожиданий, связанных с семейной, личной жизнью, или поведения в своих кругах общения и заканчивая пищевыми предпочтениями, — тем меньше новых стимулов бросают вызов вашему мозгу и тем быстрее он становится рабом привычек. Например, в детстве ваша внутренняя модель предполагала, что все люди верят в лучшее, так же как и вы. Но по мере того как жизнь учит вас, что ваши ожидания имеют свойство расходиться с реальным опытом, ваши нейронные сети перестраиваются, чтобы учитывать этот разрыв.

Или, предположим, вы вышли на новую работу. На рабочем месте все для вас внове — коллеги, должностные обязанности, подходы к их выполнению. В первые дни и недели, пока вы встраиваете в свою внутреннюю модель новую деятельность, мозг проявляет немало пластичности. Но через какое-то время вы хорошо осваиваете круг своих обязанностей, и тогда на смену гибкости приходит навык.

Такую же общую схему мы наблюдаем в становлении государств. Практически все поправки, которые они вносят в свои конституции, приходятся на первые годы становления, пока государство и граждане вырабатывают стратегии сохранения себя как самостоятельного образования. Но со временем конституция устоится, и необходимость в новых поправках уменьшится. Например, в первые 13 лет существования Соединенных Штатов Америки были приняты 12 поправок к конституции. А дальше, в любой отдельно взятый 20-летний период, принимались максимум 4 конституционные поправки, однако в большинстве

## Глава 9. Почему старого пса труднее обучить новым трюкам?

периодов поправки вообще не вводились: последняя, 27-я, была принята в 1992 году. С тех пор Конституция США сохраняет неизменность. Таким путем все страны неуклонно снижают темпы адаптации к внешнему миру: на первых порах происходят масштабные глубокие и широкие подстройки и со временем устанавливается работоспособная модель, обеспечивающая нормальное функционирование всех сторон жизни государства.

Точно таким же путем — консолидации — мозг отображает свои успехи в постижении мира. Нейронные сети глубже укореняются и закрепляются, но не из-за снижения их функций, а потому, что они уже доказали свою способность успешно предвидеть события. Неужто вы и вправду хотели бы вернуть своему мозгу детскую пластичность? Конечно, мозг ребенка как губка впитывает все, что привлекает его внимание, но суть в том, что жизнь — это прежде всего умение понять и выучить правила игры. Потери в части приспособляемости мозга мы компенсируем знанием жизни. Выстраданные нами нейронные связи необязательно безупречны, они могут быть даже внутренне противоречивы, но все же отражают наш жизненный опыт, практические знания и понимание, что к чему в нашем мире. Ребенок, хотя его мозг невероятно пластичен и восприимчив, не способен руководить компанией, ценить красоту глубоких идей или управлять государством. Не снизься пластичность вашего мозга, как бы вы закрепили в сознании общепринятые знания о мире? Вы бы никогда не приобрели способность выявлять закономерности, не освоились бы в социальной жизни, не смогли бы читать книги, поддерживать содержательный разговор, ездить на велосипеде или добывать пропитание. Сбережением тотальной гибкости мозга вы обрекли бы себя на вечную беспомощность ребенка.

А как насчет воспоминаний? Представьте, что вы приняли пиллюю, которая обновит пластичность вашего мозга. Вы получите шанс перенастроить свои нейронные сети, быстро выучить иностранные языки, освоить новое произношение и постичь современные тенденции в физике. За эти блага вы заплатите тем, что начисто позабудете все происходившее с вами в течение жизни. Ваши детские воспоминания сотрутся и заменятся новыми. Ваш первый возлюбленный, первая поездка в Диснейленд, общение с родителями — все это улетучится, как сон после пробуждения. Готовы вы платить такую цену? Стоит ли оно того?

Представьте кошмарный сценарий будущей войны: противник пускает в ход биологическое оружие, полностью восстанавливающее

## Живой мозг

пластичность человеческого мозга. Физически солдаты и офицеры во всех войсках остаются в целости и сохранности, но неотвратимо впадают в младенческое состояние. Они утрачивают умение ходить и говорить, все их воспоминания как ластиком стираются. Отправленные командованием по домам, они не узнают друзей и родных, жен и детей. Физически они вполне благополучны и способны всему обучиться заново, ибо мозг их не имеет повреждений. Однако психическая жизнь — невидимая, неосязаемая часть человеческого бытия — вернулась к исходным, заводским так сказать, настройкам и снова представляет собой чистый лист.

Нарисованная мною картина приводит в ужас, потому что, в сущности, каждый из нас — не что иное, как сумма воспоминаний. Об этом далее и поговорим.

# ГЛАВА 10

## ПОМНИШЬ, КАК...

Тилли Олсен, Tell Me A Riddle («Загадай мне загадку»):

«В тот последний день агония длилась нескончаемо. Временами конвульсии так скручивали ее, что почти срывали с постели, и им приходилось чуть ли не бороться с ней, чтобы уложить обратно. Не в силах больше выносить этот кошмар, он вышел из комнаты и зарыдал так, словно старался излить все отпущеные ему слезы, чтобы потом никогда больше не выдавать из себя ни слезинки.

Дженни подошла утешить деда. “Дедушка, дедушка, не плачь, — увещевала она его своим нежным голоском. — Она уже не здесь, она обещала мне. Бабушка говорила, что в свой последний день вернется в ту пору, когда впервые услышала музыку, еще совсем маленькой, — на деревенской улице, где родилась. Она мне пообещала. Тогда играли свадьбу, все танцевали, и голоса флейт радостно переливались в воздухе. Оставь ее там, дедушка, так надо. Она мне пообещала. А ты возвращайся, возвращайся туда и помоги умереть ее бедному телу”».

В этом эпизоде Тилли Олсен показывает, как умирает бабушка, уже старенькая, утратившая воспоминания о своей жизни, кроме самых первых, детских, которые отложились в памяти в ярких, живых подробностях. Если вам приходилось знавать стариков с деменцией, думаю, вы подметили у них эту особенность.

А вообще это самый старинный из всех выявленных неврологией паттернов. Еще в 1882 году данное наблюдение признал как каноническое французский психолог Теодоль Рибо, пораженный тем фактом, что у старых людей память о днях юности прочнее, чем более свежие воспоминания<sup>1</sup>. Феномен обратного развития памяти известен как закон Рибо, объясняющий, почему некоторые люди под конец жизни переходят на язык своего детства. В 1955 году, умирая в Принстонском госпитале, Альберт Эйнштейн что-то говорил. Все хотели бы знать, что именно

великий ученый пожелал сказать миру на пороге небытия, но мы никогда не узнаем этого, потому что говорил он по-немецки, на своем родном языке. Дежурившая в ту ночь сиделка знала только английский, и потому последние слова Эйнштейна навсегда утрачены для нас.

Неудивительно, что Рибо чрезвычайно впечатлила странность обнаруженного им свойства памяти: другие системы хранения данных работают совсем не так. Институциональная память предает забвению прошлые эры и прошлых правителей, образовательные институты сосредоточиваются на недавних трендах и достижениях, городские власти больше похваляются недавними свершениями, чем вспоминают достижения вековой давности.

Почему же у мозга память устроена задом наперед? Почему воспоминания большей давности закрепляются прочнее? Это и есть важнейший ключ к пониманию принципов, по которым происходит работа под крышкой черепа. И сейчас мы обратимся к одному из главнейших аспектов нейронных связей — феномену памяти.

## Разговор с собой послезавтрашим

Доколь прощанья час не соизволит грянуть,  
Ты веселей скреби свои скрижали, Память!

Мэтью Арнольд (1822–1888),  
английский поэт и культуролог  
Викторианской эпохи

Леонард Шелби, главный герой психологического детектива Кристофера Нолана\* «Помнит», страдает неспособностью перемещать кратковременные воспоминания в долговременную память — такая патология, известная как *антероградная амнезия*, выражается в нарушении памяти о событиях после начала заболевания. Шелби способен помнить события, произошедшие за последние пять минут, а все, что было раньше, из памяти улетучивается. И он вынужден повсюду оставлять себе записки о недавних событиях, а все самое важное — включая миссию найти убийцу своей жены — запечатлевает на теле в виде татуировок (рис. 10.1). Таким образом он общается с самим собой по прошествии времени.

\* Кристофер Нолан (р. 1970) — британский и американский кинорежиссер, сценарист и продюсер. Прим. ред.

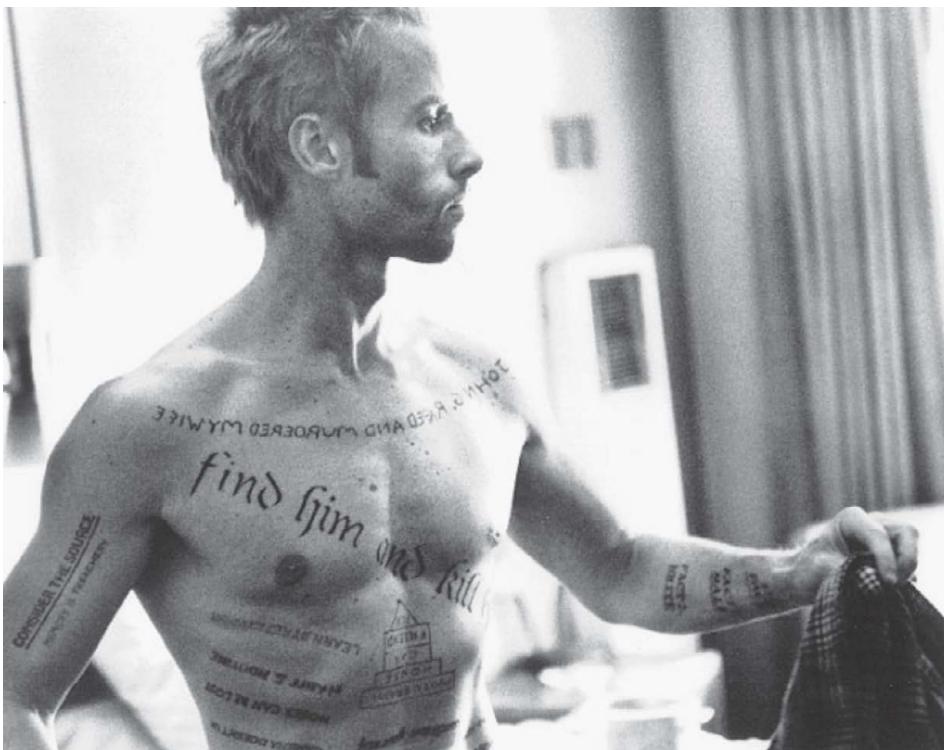


Рис. 10.1. Леонард Шелби с памятками на теле

Все мы немножечко Леонарды Шелби. Правда, с той разницей, что вместо татуировок запечатлеваем критически важные для нас сведения где-я-был-что-делал непосредственно в наших нейронных сетях. Благодаря этому мы, будущие, знаем, что пережили и через что прошли, и поэтому становится ясно, что делать дальше.

Примерно 2400 лет назад Аристотель в трактате «О памяти и воспоминании» (*De memoria et reminiscentia*) уже делал попытку описать способность к запоминанию и воспользовался аналогией, что память способна воспринимать «формы ощущаемого без его материи», подобно тому как воск воспринимает отпечаток перстня. К сожалению, у Аристотеля не имелось данных, на которые можно опереться, и потому нейронная магия, посредством которой событие внешнего мира запечатлевается как воспоминание внутри головы, более двух тысячелетий оставалась непостижимой тайной.

Только сейчас нейробиология начинает разгадывать ее. Нам известно, что, когда вы узнаёте новый факт (скажем, как зовут вашего соседа),

в структуре мозга происходят физические изменения. Нейробиологи десятилетиями пытались разобраться, в чем состоят эти изменения, как они организуются в огромном море нейронов и как их прочитать десятки лет спустя. Благодаря этим усилиям пазл постепенно складывается, хотя многие его фрагменты до сих пор отсутствуют.

Интенсивно изучаются примитивные формы памяти на молекулярном и сетевом уровнях у относительно простых существ вроде головожаберных моллюсков (морских слизней). Почему ученые выбрали именно их? А потому, что у этих созданий нейроны крупные и их, в сравнении с таким сложным организмом, как человек, не слишком много, что облегчает задачи исследователей. Типичный эксперимент проводится так: ученые деликатно тычут палочкой в морского слизня. Он отдергивается. Если повторять тычок каждые 90 секунд, слизень в конце концов перестает реагировать, потому что «помнит»: раздражитель — тычок палочкой — никакого вреда ему не причинил. Затем экспериментаторы сочетают тычок с подачей электрического разряда на хвост слизня, после чего рефлекс отдергивания от простого тычка усиливается: слизень «помнит», что за тычком следовало нечто опасное<sup>2</sup>.

Подобные эксперименты открыли много нового относительно изменений в мозге на молекулярном уровне; однако животные, позже прибывшие на праздник эволюции (млекопитающие, например), наделены памятью более мощной и сложной, чем память беспозвоночных. Так, люди могут помнить подробности своих биографий. Мы чаще всего помним, о чем когда-то мечтали и что представляли себе. Мы способны помнить пространственные особенности обширных географических регионов, а также усваивать сложные навыки, позволяющие успешно справляться с превратностями коммерческих, социальных и климатических условий. И, что очень удобно, мы умеем забывать несущественные мелочи, скажем где располагался пункт упаковки багажа в аэропорту, откуда мы вылетали две недели назад, или дословное содержание какого-то разговора.

Первое систематическое исследование физических основ памяти у млекопитающих предпринял в 1920-е годы гарвардский профессор Карл Лешли. Согласно его рассуждениям, если он может обучить лабораторную крысу чему-нибудь новому, например преодолевать лабиринт, то мог бы, видимо, в нужном месте стереть этот фрагмент ее памяти, сделав надрез на маленьком участке мозга. Все, что ему осталось, — отыскать это магическое местечко, изъять его и показать, что крыса утратила воспоминания о правильном маршруте через лабиринт.

Лешли натренировал два десятка особей преодолевать ходы лабиринта. Затем у разных особей надрезал скальпелем кору мозга в разных местах. Дав крысам время оправиться, он снова проверил их на знание прохода через лабиринт, чтобы определить, повреждения в каких участках лишают крыс приобретенного знания.

Эксперимент провалился: все крысы прекрасно помнили, каким маршрутом бежать. Однако провал обернулся долгоиграющим успехом. Лешли сообразил, что память у крыс локализована не на каком-то одном участке коры, а, напротив, широко распределена. Его эксперимент доказал, что в мозге нет отдельной отвечающей за память структуры. Память не хранится в подобии картотечного шкафа, а скорее напоминает распределенные облачные вычисления — примерно так же ваша электронная почта рассеяна по серверам всей планеты, зачастую даже избыточно.

Но тогда каким образом воспоминание — чье-то имя, маршрут лыжной прогулки или фрагмент музыкального произведения — записывается в широко раскинувшемся сети из миллиардов нейронов? Какой язык программирования переводит область пережитого в область физического выражения?

В XIX веке, еще до появления микроскопий высокого разрешения, господствовало представление, что нервная система, образуемая мириадами пронизывающих тело проводящих путей из нервных волокон, является собой такую же непрерывную сеть, какую образуют кровеносные сосуды. Данная точка зрения не подвергалась сомнениям до начала XX века, когда Сантьяго Рамон-и-Кахаль пришел к мнению, что мозг представляет собой коалицию миллиардов дискретных структурных единиц — клеток. Следовательно, нервная система — это, образно выражаясь, не магистральное шоссе, а мешанина из множества сообщающихся локальных дорог. Рамон-и-Кахаль назвал свою концепцию нейронной доктриной, за которую в 1906 году удостоился одной из первых Нобелевских премий в области физиологии и медицины (разделив ее с итальянским врачом и ученым Камилло Гольджи). Нейронная доктрина поставила новый вопрос: если клетки мозга изолированы друг от друга, то как они общаются? Ответ нашелся быстро: они соединяются в специализированных участках, синапсах. Рамон-и-Кахаль предположил, что обучение и запоминание могут происходить за счет перемен в силе синаптических связей.

К 1949 году Дональд Хебб уже какое-то время обдумывал эту идею и нашел способ усовершенствовать ее. Он предположил, что если клетка А устойчиво участвует в активации клетки В, то связь между ними

усиливается (потенцируется)<sup>3</sup>. Иными словами, кто вместе возбуждается, те вместе соединяются (см. также главу 3).

В те времена, когда Хебб выдвинул свою гипотезу, экспериментальных доказательств в ее поддержку не существовало. Позже, в 1973 году, двое ученых открыли некое явление, которое могло указывать, что Хебб со своей гипотезой попал в самое яблочко. После стимуляции нервных волокон в гиппокампе они обнаружили усилившуюся электрический ответ от принимающей (постсинаптической) клетки. Этот сигнал сохранялся до десяти часов. Исследователи назвали это явление долгосрочным потенцированием, каковое и стало первой демонстрацией изменения силы связей в результате их недавней активности<sup>4</sup>.

Следующий шаг в исследованиях был очевиден: то, что усиливается, должно обладать и свойством ослабляться. Если синаптическая связь способна потенцироваться, ей требуется и способность подавляться, иначе сеть достигнет насыщения и утратит потенциал сохранять что-то новое. К 1990-м годам удалось показать, что различные манипуляции (например, А возбуждается при отсутствии ответа со стороны В) могут повлечь за собой долговременное подавление, то есть сила связи между двумя клетками ослабнет. Ученые заключили, что найдены физические основы памяти<sup>5</sup>. В самом деле, мельчайшие изменения в связях способны радикально изменить реакцию сети на выходе. Активность передается по системе на основе происходившего ранее. Если правильно настроить параметры, сеть может создать связи между одновременно происходящими активностями. Идея в том, что такого рода простой механизм может лежать в основе всех ваших жизненных воспоминаний.

Возьмем, например, вашего лучшего друга и его дом. Вид друга запускает в действие одну популяцию нейронов, а при виде дома приходит в действие уже другая. И поскольку, когда вы приходите домой к другу, обе группы одновременно активны, между видом друга и видом дома выстраивается ассоциативная связь; в этом и лежит основа ассоциативного обучения. Когда одно из понятий приводится в действие, оно пробуждает к жизни связанное с ним второе. Но что еще примечательнее, каждое из этих понятий может активировать множество других ассоциаций, скажем воспоминание о ваших разговорах, совместных трапезах или о чем-то развеселившем вас обоих.

В начале 1980-х годов Джон Хопфилд\* предпринял попытку определить, сможет ли очень упрощенная искусственная нейронная сеть

\* Джон Хопфилд (р. 1933) — американский ученый, изобретатель ассоциативной нейронной сети (1982), известной как сеть Хопфилда. Прим. ред.

сохранить небольшой набор «воспоминаний»<sup>6</sup>. Он обнаружил, что если предъявить ей ряд паттернов (например, буквы алфавита) и усилить синапсы между нейронами, которые возбуждаются одновременно, то сеть сможет запомнить паттерны. Каждая буква (пусть это будет Е) запускала конкретное созвездие нейронов, и связь между ними усиливалась. В отличие от Е, буква S будет представлена другим паттерном. Обучив сеть алфавиту, Хопфилд перешел к следующему этапу: предъявлял сети поврежденную версию одного из паттернов (скажем, Е со срезанной верхушкой), и каскад активности в сети приводил к восстановлению ее полного паттерна. Иными словами, сеть сама приводила ущербный паттерн в соответствие уже выработанным предшествующим опытом представлениям о том, как полагается выглядеть паттерну, кодирующему букву Е. Более того, выяснилось, что подобные сети поразительно устойчивы к разрушению: если удалить несколько узлов, распределенная память сети все равно будет способна выдавать «воспоминания». Таким образом, Хопфилд представил мощное доказательство того, что простая искусственная сеть способна хранить воспоминания, что послужило стимулом к многочисленным исследованиям сетей Хопфилда<sup>7</sup>.

В последующие десятилетия искусственные нейронные сети сделали громадный скачок вперед. Этому в значительной степени способствовали не столько новые теоретические открытия, сколько доступность современных вычислительных мощностей, позволяющих моделировать гигантские искусственные сети, состоящие из миллионов или даже миллиардов элементов<sup>8</sup>. Подобные сети способны на феноменальные достижения: например, они обыгрывают лучших в мире шахматистов и лучших игроков в го\*. Но при всей шумихе вокруг искусственных нейронных сетей они еще очень далеки от способности функционировать подобно человеческому мозгу. И хотя их возможности невероятно впечатляют, они феерически провальны, если от них требуют переключиться с одной задачи на другую, скажем с различения кошечек и собачек на различение птичек и рыбок. Искусственные нейронные сети созданы по образу и подобию человеческого мозга, однако они двинулись в собственном, упрощенном направлении. Если мы хотим понять магию живого мозга (то есть все то, на что способен он, но пока не способны искусственные нейронные сети), нужно со всей ясностью оценить вызовы, с которыми сталкивается биологическая память, равно как и ее хитрости и уловки.

---

\* Го — логическая настольная игра, возникшая в Древнем Китае от двух до пяти тысяч лет назад. Входит в число пяти базовых дисциплин Всемирных интеллектуальных игр.  
Прим. ред.

## Враг воспоминаний – не время, а другие воспоминания

Первая трудность для мозга заключается в его долгожительстве. Животные сталкиваются с меняющейся, полной опасностей и вызовов средой обитания, и потому им требуется непрерывно, годами или десятилетиями, воспринимать новую информацию. Однако пожизненное обучение вынуждено постоянно поддерживать равновесие канатоходца с шестом: сберегать старые данные и при этом усваивать новые. В искусственных нейронных сетях обучение происходит в тренировочной фазе (как правило, на миллионах примеров), а затем тестируется в фазе воспроизведения. Нам, животным, такая роскошь недоступна: всю жизнь приходится на лету проделывать и то и другое.

К сожалению, модели памяти, построенные на основе базовых хрестоматийных принципов синаптических изменений, тотчас же сталкиваются с проблемой: в итоге выученное позднее записывается поверх выученного ранее<sup>9</sup>. А насыщенные воспоминаниями искусственные сети деградируют в сторону загрязнения памяти. Более ранние воспоминания после новой активности в системе затушевываются, и вскоре вы уже к концу первого акта пьесы не сможете вспомнить ее начало. Эту проблему называют *дилеммой стабильности — пластиичности*, суть которой — в понимании того, как мозгу удается одновременно и сохранять выученное, и воспринимать новое. В любом случае необходимо, чтобы воспоминания были каким-то образом защищены — но не от буйства быстротечного времени, а от вторжения других воспоминаний.

Если искусственные нейронные сети страдают от загрязнения воспоминаний, то живой мозг таких сложностей не испытывает. Чтение новой книги не вытеснит из вашей памяти имя супруги, как и новое заученное слово нисколько не обеднит ваш словарный запас.

Сам факт, что мозг умеет обходить эту дилемму, каким-то образом закрепляя более давние воспоминания, есть свидетельство тому, что усиление и ослабление синапсов в нейронной сети еще не передает общей картины, — очевидно, что происходит нечто более сложное.

Первое решение дилеммы стабильности — пластиичности: позаботиться, чтобы вся система разом не менялась. Пусть гибкость включается/выключается только на малых участках сообразно релевантности. Как мы видели выше, нейромодуляторы тщательно контролируют пластиичность синапсов, и благодаря этому обучение может происходить

только в нужных местах и в нужное время, а не каждый раз, когда активность распространяется вдоль всей сети<sup>10</sup>. Таким образом замедляется ее деградация, поскольку сила синапсов меняется лишь тогда, когда происходит нечто важное (скажем, вам называют имя нового сотрудника, вы узнаёте новость о родителях или о том, что по телевизору вечером покажут новый сезон вашего любимого сериала). Но если дело касается ненароком увиденной уличной вывески, цвета сорочки прохожего или рисунка трещин на тротуаре, у сети нет надобности в переменах. Одна из функций нейронной сети — изменение только в случае релевантности стимула — напоминает нам, что мозг вовсе не чистый лист, на котором реальность кропает свои истории, он приходит в мир заранее экипированным под определенные типы обучения в ситуациях определенного типа. Фрагменты опыта преобразуются в воспоминания, когда они значимы для жизни организма, а особенно если окрашены сильными эмоциями вроде страха или удовольствия. Такой порядок снижает шансы на перенасыщение сети, поскольку в нее записывается не все.

Впрочем, подобное устройство памяти не решает дилемму стабильности — пластичности, потому что у индивида есть еще великое множество ярких воспоминаний, о сбережении которых стоит позаботиться.

На этот случай мозг предусмотрел второе решение. Он не всегда хранит воспоминания в одном месте, а передает выученное другой области на более долговременное хранение.

## Одни части мозга обучают другие

Представим себе склад. Если вам беспрерывно поставляют новые и новые коробки, складское помещение в конце концов забывается до потолка. Но если отгружать часть коробок по мере их поступления, складу удастся сохранять свободные площади под новые поставки. По такой же логике воспоминания зачастую не остаются там, где первоначально образовались, а переправляются в другие места.

Часть информации о памяти мы получили из знаний о гиппокампе и прилежащих к нему областях мозга, где располагается центр формирования памяти. В 1953 году 27-летнему пациенту Генри Молисону удалили гиппокамп в обоих полушариях, чтобы избавить мужчину от эпилептических припадков. После операции у Молисона обнаружилась глубокая амнезия: он утратил способность формировать новые воспоминания и усваивать новые факты. Как ни удивительно, но Генри все

же смог обучиться ограниченному набору новых навыков (например, зеркальному чтению), хотя у него не отложилось воспоминаний о самом обучении. Как показали исследования Бренды Милнер\* и ее коллег, память Молисона о событиях, произошедших до операции, оставалась почти в норме. Его случай сфокусировал внимание ученых на гиппокампе: в частности, их заинтересовал вопрос, почему эта структура играет решающую роль в заучивании фактов, но не критична для удержания их в памяти<sup>11</sup>.

А дело в том, что гиппокамп играет в обучении временнную роль и не служит местом постоянного хранения воспоминаний: он передает эту информацию участкам коры, способным более длительное время сохранять ее. Молисон мог в подробностях вспомнить события, предшествовавшие операции<sup>12</sup>, но то, что случилось позже, помнить не мог, так как для формирования новых воспоминаний требовался гиппокамп, к тому моменту удаленный.

Так каким же образом воспоминания переезжают со станции Гиппокамп на постоянные квартиры в коре головного мозга? Одно из предположений таково: устойчивое сохранение достигается не с первого раза, когда некий паттерн активности проходит через кору; напротив, чтобы воспоминание в ней закрепилось, гиппокамп должен несколько раз реактивировать эту дорожку. Отсюда можно предположить, почему гиппокамп необходим для закрепления воспоминания: ему необходимо снова и снова проигрывать паттерны для коры<sup>13</sup>. Попадая в кору, воспоминания со временем стабилизируются. В случае с Молисоном было иначе: повторные активации отсутствовали, а значит, отсутствовали и воспоминания. Система сохранилась такой же, какой и была.

Подобное перемещение воспоминаний наблюдается во многих областях мозга. Предположим, вы выучили новые ассоциации: красный квадрат означает, что надо поднять руку вверх, синий круг — хлопнуть в ладости. Со временем, после должной тренировки, вы сможете быстрее реагировать на эти знаки. Пока вы обучаетесь данному навыку, в определенных областях мозга (например, в хвостатом ядре) легко заметить изменения в ответ на подкрепляемые вознаграждением ассоциации. Однако если вы продолжите поднимать руку и хлопать в ладости, соответствующая активность в конце концов обнаружится в других областях мозга (в префронтальной коре). В данном отделе нейроны меняются

---

\* Бренды Милнер (р. 1918) — англо-канадский нейрофизиолог, всемирно признанный ученый в области клинической нейropsихологии. Прим. ред.

медленнее, и это наводит на предположение, что первая область преподает полученные знания второй<sup>14</sup>.

Еще пример: когда вы первый раз встаете на ролики, вам приходится все время следить за движениями рук и ног и прикладывать массу сознательных усилий. Но после многодневной практики вы уже не думаете, как двигать ногой или рукой, а проделываете движения автоматически. Так происходит потому, что структуры мозга, вовлеченные в моторное обучение (базальные ганглии), передают выученное другим отделам, в данном случае мозжечку.

Идея переадресовки поступающих пакетов воспоминаний помогает разрешить дилемму стабильности — пластичности, но открытым остается вопрос ограниченности «складского пространства». Если вы отгружаете свои пакеты по всему миру, никаких затруднений не возникает. Но если вы просто переправляете их на другой склад, то вместе с ними перемещается и проблема свободных складских площадей, ведь второй склад тоже вскоре заполнится.

Все эти соображения выводят нас на исходную точку пути к третьему, более углубленному решению.

## За пределами синапсов

Открытие феномена синаптических изменений побудило тысячи исследователей к подробному описанию этого явления и изучению его молекулярных структур. Однако усиление и ослабление синапсов не только не единственный, но еще и не самый важный механизм памяти<sup>15</sup>. Результаты изучения данных процессов на протяжении десятилетий свидетельствуют о том, что синаптическая пластичность важна для обучения и запоминания, но свидетельств того, что этого достаточно, нет.

Возможно, изменение силы синапсов — всего лишь способ, с помощью которого взаимосвязанные клетки уравновешивают возбуждение и торможение, чтобы не допускать эпилепсии (перевозбуждение) или выключения сознания (сверхторможение). В этом свете синаптические изменения представляются последствиями сохранения воспоминаний, но никак не основным механизмом памяти. Исследователи — как теоретики, так и экспериментаторы — уделяют наибольшее внимание изменениям в отдельных синапсах, не принимая в расчет подобные процессы, порожденные активностью других компонентов системы. При таком подходе нейробиология рискует

## Живой мозг

упустить из виду часть Розеттского камня\* памяти и так и не найти ключи к окончательной расшифровке ее механизма. На самом деле в нервной системе мы повсюду обнаруживаем настраиваемые параметры. У Матушки-природы предусмотрены тысячи уловок для накопления мелких изменений, каждое из которых способно изменять поведение сети.

Представьте, что вы внеземное существо, впервые обнаружившее новую форму жизни — человека. Разве вас не озадачит такое множество подвижных частей и структур, совместно образующих живую систему, именуемую человеческим мозгом? Наблюдая, как люди взаимодействуют между собой в повседневной жизни, ваши инопланетные глаза с высокой разрешающей способностью начнут замечать изменения в формах нейронов под влиянием приобретаемого опыта, скажем рост или усиление дендритов. Сфокусировав взгляд, вы заметите изменение объема сигнальных химических веществ, продуцируемых одной клеткой в ходе коммуникации с другой, а также изменение числа рецепторов при приеме химического месседжа. Вас восхитят своей изощренностью молекулярные и ионные каскады внутри нейронов, осуществляющие вычисления и подстройки в ответ на каждый новый стимул. В нейронном ядре вы увидите, как замысловатые химические структуры прикрепляются к извилистым нитям ДНК, вызывая большую экспрессию одних генов и подавляя другие.

Вас, вероятно, поставит в тупик столь сложно устроенная система, в которой пластичность проявляется повсеместно, во всех механизмах. Они все гибко-подвижны. Параметры меняются на всех уровнях и во всех масштабах, от роста и встраивания новых рождающихся нейронов до изменений в экспрессии генов. Когда биологическая система допускает такое огромное количество степеней свободы, возможности для стратегий сохранения памяти беспредельны.

В сущности, у нас имеется много надежных оснований считать, что синапсы не единственное, что меняется. Во-первых, если обучение только настраивает эффективность действующих синапсов, нам не следовало бы ожидать крупных перемен в структуре мозга. Однако при его визуализации можно видеть значительные перемены, когда, например, добровольцы в ходе экспериментов учатся жонглировать, студенты-медици

\* Розеттский камень найден в 1799 году в Египте, возле города Розетта (ныне Рашид). На плите размерами 114,4 × 72,3 × 27,9 см выбиты три идентичных по смыслу текста: два на древнеегипетском языке и один на древнегреческом. Сопоставление трех текстов послужило отправной точкой для расшифровки египетских иероглифов. Хранится в Британском музее. Прим. ред.

готоятся к экзаменам или лондонские таксисты заучивают схему расположения улиц<sup>16</sup>. Кортикальные изменения не сводятся только к модификации синапсов, а, судя по всему, предполагают добавление нового клеточного материала<sup>17</sup>.

Во-вторых, если воспоминания просто удерживаются в матрице синаптических весов, у нас нет причин ожидать нейрогенеза, то есть роста и встраивания в систему новых нейронов<sup>18</sup>. По идеи, когда новоиспеченные нейроны, порождаемые гиппокампом, будут втискиваться в сеть, следовало бы ожидать, что они рискуют спутать тонкий синаптический узор. Тем не менее они успешно находят дорогу во взрослую кору. Эти нейроны не лишние, их можно направить на формирование памяти. Например, если тренировать крысу на выполнение задания, требующего участия гиппокампа, число новых нейронов, генерируемых мозгом, удваивается по сравнению с базовым уровнем. И наоборот, если задание не требует участия гиппокампа, число новых нейронов в мозге крысы не изменится<sup>19</sup>.

В-третьих, в результате колебания уровней сахаров и белков вокруг ДНК изменяются паттерны экспрессии генов<sup>20</sup>. Исследования в этой относительно новой области — эпигенетике — показывают, что жизненный опыт вносит свои поправки в определение того, какие гены подавляются, а какие усиливаются. В качестве примера отметим, что мышата, воспитывающиеся в благоприятных условиях (мать часто вылизывает их и ухаживает за шерсткой), демонстрируют пожизненные изменения в паттернах молекул, которые прикрепляются к нитям ДНК, что, как выясняется, на всю жизнь снижает тревоги и страхи детенышей, а также повышает заботливость в отношении уже их потомства<sup>21</sup>. Таким образом ваш жизненный опыт проникает под кожу — и еще глубже, до уровня экспрессии генов, где может встроиться на длительный срок.

Когда нейрофизиологи и разработчики искусственного интеллекта говорят об изменениях в сети, они обычно подразумевают изменения в силе связей между клетками. Однако, на наш свежий дилетантский взгляд, синапсы обречены на недостаточность, потому что пластичность проявляется в мозге на каждом уровне. Характер протекания активности в сетях определяется всеми их настройками, как крупными, так и мелкими. К какой бы части мозга мы ни обратились, пластичность обнаруживается везде. Но тогда почему ученые сосредоточены почти исключительно на синапсах? А потому, что их активность проще всего замерять. Остальные процессы в целом выражены слишком слабо и протекают в мозге слишком стремительно, чтобы современные технологии

могли зафиксировать их. По этой причине мы, подобно пьянице, который ищет ключи под фонарем, концентрируем внимание на том, что можем увидеть и измерить.

\*\*\*

Таким образом, в распоряжении мозга множество кнопок, которые он может задействовать, что подводит нас к следующему фрагменту истории: как мозг при наличии стольких настраиваемых параметров умудряется что-либо изменять, не внося сумбур и путаницу во все другие функции? Как осмыслить взаимодействие всех его частей и структур? В чем состоят принципы, посредством которых многие степени свободы не вырываются из-под контроля, а, напротив, поддерживают друг друга в рамках единой системы сдержек и противовесов?

Я предлагаю рассматривать эти вопросы не с позиций биологических особенностей частей мозга, а с позиций временного масштаба, в котором они функционируют. Нашу историю о тайнах изменчивости мозга следует раскрывать не через подробности устройства его механизмов, а через темпы их жизнедеятельности.

## Включаем разные временные шкалы

Несколько лет назад американский писатель и футуролог Стюарт Бранд предложил рассматривать цивилизацию как многослойную систему, слои которой функционируют одновременно, но в разном темпе<sup>22</sup>. Так, мода быстротечна, а промышленные предприятия в какой-либо отрасли меняются значительно медленнее. Инфраструктура — дороги, здания, коммуникации — развивается постепенно. Правила и законы жизни общества — управление — адаптируются очень медленно, защищая нас от ветров перемен. Культура идет вперед по собственному расписанию, опираясь на глубинные основы истории и традиций. Медленнее всего движется природа, отсчитывая свою историю по шкале веков и тысячелетий.

Временные шкалы взаимодействуют, пусть это и не всегда заметно. Слои, живущие более быстрыми темпами, передают накапливающиеся новшества живущим медленнее. Последние, в свою очередь, устраивают слоям-торопыгам проверки на прочность и структурирование. Сила и устойчивость культуры обеспечиваются взаимодействием всех уровней системы (рис. 10.2).

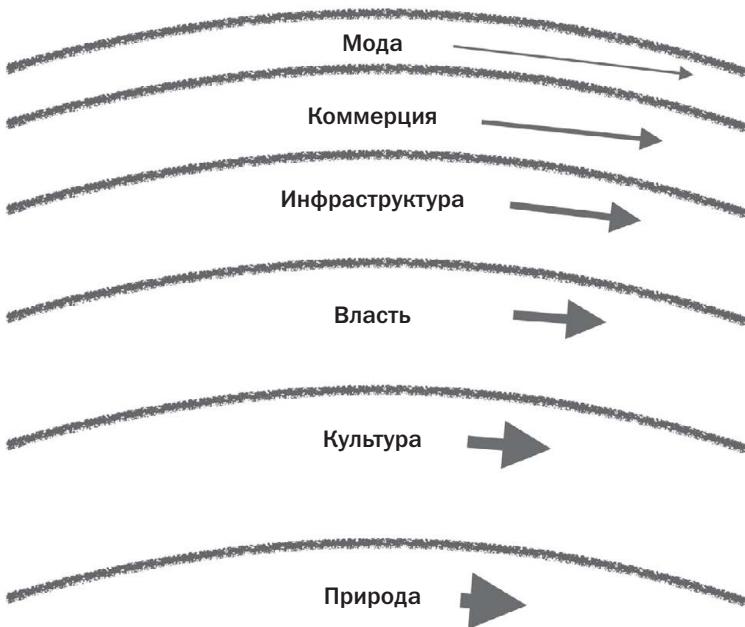


Рис. 10.2. Разнотемповые слои системы

Принцип разбиения на слои в зависимости от их динамики полезен при рассмотрении мозга. Правда, диапазон здесь будет другой: не от скоротечной моды до величественно неторопливой Матери-природы, а от быстрых биохимических каскадов до изменений экспрессии генов. В мозге меняются не только синапсы, но и множество других параметров (для посвященных: сюда входят типы и распределение каналов, состояния фосфорилирования, формы нейритов, скорость транспорта ионов, темпы продуцирования оксида азота, биохимические каскады, пространственная локализация ферментов и экспрессия генов). Если эти потоки активности правильно связаны между собой, мимолетное событие может оставить в системе след, потому что быстрые каскады запускают более медленные, которые в конечном счете могут запускать еще более медленные процессы, а те в свою очередь — постепенные глубинные перемены. Таким образом, изменения пластичности разнесены по временному спектру, а не сохраняются по принципу «всё или ничего». Все формы пластичности взаимодействуют одна с другой, и мощь системе придает слаженное действие всех ее временных слоев<sup>23</sup>.

Мы видим много разных проявлений действия этой многотемповой системы. Предположим, вы страстно влюбились в слабослышащую

девушку — и бросились изучать сурдоязык\*. Всякий раз, когда вам удастся жестами выразить свои чувства, возлюбленная вознаграждает вас кокетливой улыбкой. Вы всё лучше осваиваете жестовый язык и уже изъясняетесь на нем вполне бегло, как вдруг девица, на вашу беду, уезжает из страны. Никто больше не поощряет улыбками затейливый танец ваших осиротевших пальцев, и со временем сурдоязык забывается. Вы уверены, что ваши отношения с ним закончились. Но проходит три года, и в городе поселяется другая слабослышащая девушка. Может, от тоски по несбывшемуся, может, еще почему, но она в ваших глазах обладает не меньшей привлекательностью, чем прежняя возлюбленная. И чтобы общаться с ней, вы снова обращаетесь к сурдоязыку. Увы, вы начисто забыли его: ваши пальцы, хоть убейся, не помнят, как «произнести» хотя бы слово. Вы в трансе, потому что в прошлый раз обучались сурдоязыку целых два месяца, а вашей новой возлюбленной, уверены вы, не хватит терпения дождаться, пока вы «разговоритесь». Но вскоре вы, к своей радости, убеждаетесь, что повторное обучение идет гораздо быстрее, и через три дня уже вовсю флиртуете с новой пассией. И хотя вы считали, что все начисто забыли, теперь снова изъясняетесь на сурдоязыке как заправский знаток.

Сэкономленное при повторном обучении время означает, что знания не пропали бесследно, а сохранялись где-то в мозге все те унылые годы, пока у вас не было практики<sup>24</sup>. Экономия времени обусловлена медлительностью перемен в более глубинных составляющих системы. Во время первого ухаживания сурдоязыку выучились ее динамично функционирующие части и с ростом практики передали изменения в более глубокие слои. Когда лайнер унес вашу даму сердца в далекие края, более проворные слои быстро подстроили свое поведение под новые обстоятельства. А более глубокие слои сомневались, стоит ли следовать их примеру: им не хотелось лишаться плодов долгого, медленного обучения, в которое они вложились. И когда в вашей биографии появилась вторая слабослышащая прелестница, глубинные слои почувствовали в себе готовность снова использовать сурдоязык, чем сберегли вам время на обучение. Вы-то думали, что навык забыт, а он, оказывается, глубоко впечатался в схему ваших нейронных связей.

Запрятанные в глубинах мозга накопленные навыки сохраняются до востребования в самых разнообразных обстоятельствах, даже в открытом космосе. Когда космонавты приземляются в спускаемом аппарате

---

\* Сурдоязык — язык, состоящий из комбинации жестов в сочетании с движением губ.  
Прим. ред.

после длительного пребывания на орбите, они не то чтобы шустро выскакивают и вприпрыжку бегут в ближайший Starbucks — нет: первым делом космонавту нужно вспомнить навык ходьбы в условиях гравитации, почти так же, как если бы он съездила учился ходить. Правда, повторное обучение происходит быстро и требует гораздо меньше времени, чем в детстве. Вообще первые попытки космонавта после приземления сделать хотя бы шаг показывают, как глубоко укоренен этот навык в мозге, и позволяют достаточно точно предсказать, насколько быстро восстановится способность к ходьбе<sup>25</sup>.

Наличие в мозге разнотемповых слоев проливает новый свет на изученную нами ранее схему. Помните Дестина Сэндлина и его хитрый велосипед с обратным рулем (глава 5)? Дестин месяцами осваивал навыки управления, а потом обнаружил, что на нормальном велосипеде ездить не может (правда, вскоре приспособился управлять обоими). Почему? Потому что для езды на каждом велосипеде в его мозге выстроилась своя нейронная схема. И теперь мы можем понять ее суть и смысл на более глубинном уровне: быстро полученное знание вовсе не записывается поверх предыдущего («Я научился ездить на велосипеде с рулем наоборот, и теперь программа езды на велосипеде с нормальным рулем стерлась»). Напротив, обе программы сохраняются в глубинных слоях мозга. После тренировок Дестин превратил обе программы в долговременные схемы, а контекст («На каком велосипеде я сейчас еду?») указывает, которую из них активировать.

Исключительно полезные программы в конечном счете оказываются впечатаны в память на уровне ДНК. Возьмем инстинкты — врожденные формы поведения, не требующие обучения<sup>26</sup>. Им мы обязаны пластичностью, которая действует на значительно более длительном временном промежутке, — дарвиновской пластичностью видов. Под действием естественного отбора те, кто обладал инстинктами, благоприятствующими выживанию и размножению, многие тысячи лет выживали и давали потомство.

\*\*\*

Век назад одним из препятствий к раскрытию тайн памяти служил недостаток технологических инструментов. А сегодня подобной преградой стало, наоборот, наличие технологий — особенно компьютеров. Цифровая революция основательно изменила каждый аспект нашей жизни, что проявляется, в частности, при употреблении слова «память». Человеческий мозг сохраняет информацию, руководствуясь совершенно иными принципами, чем компьютер: он запоминает и потом может

## Живой мозг

воспроизвести в памяти фильм, не кодируя его кадры пиксель за пиксели, а свои любимые истории мы тоже помним и можем повторить без кодирования слова за словом. Например, если вам рассказывают анекдот, нет нужды кодировать отдельный нейронный лог-файл\* для каждого слова и падежа, в котором оно употреблено. Напротив, вы уясняете суть анекдота. Если вы владеете двумя языками, то сможете услышанный на одном языке анекдот пересказать на другом. В любой шутке главное не точные слова, в которые она облечена, а внутренние представления, вызываемые в сознании.

Мы кодируем не пиксели и значки, а новые стимулы, причем сообразуем их с уже имеющимися знаниями, включая известные нам физические и социальные понятия. Новое знание воспринимается через призму уже усвоенного. Так, двое могут смотреть на список важных дат в истории Монголии, но если в мозге одного из них имеется детализированная модель этой страны, то новые данные легко и просто встроятся в его сеть знаний. У другого же, если он мало что знает о Монголии и никогда не бывал там, новым фактам не за что будет зацепиться, и он их, скорее всего, не усвоит.

Вспомним, что в модели разнотемповых слоев медленные слои образуют основу для быстрых. В итоге самый ранний опыт служит фундаментом и развивается в структуру, на которую надстраивается весь последующий опыт. Все новое пропускается через фильтр узнанного ранее.

К добру или к худу, но по этой причине некоторые наши мечты о будущем неосуществимы. Помните, в фильме «Матрица» Нео и Тринити находят на крыше здания вертолет В-212. Нео спрашивает: «Ты умеешь водить такой вертолет?» Тринити отвечает: «Пока нет», а сама звонит коллеге и просит «программу пилотажа для вертолета В-212». Коллега лихорадочно стучит по клавиатурам компьютеров и за какие-то секунды загружает в мозг Тринити нужную программу. Они с Нео забираются в вертолет, Тринити садится за штурвал и мастерски лавирует между зданиями.

Каждому пришлось бы по душе такое будущее, да только нам его не видать. Почему? А потому, что память есть функция всего, что ранее уложилось в ней. У кого-то знания о том, как пилотировать вертолет В-212, могут быть закодированы по принципу схожести с управлением мотоциклом. Другой человек, возможно, с детства умеет ездить верхом,

---

\* Лог-файл — документ с последовательной записью всех событий, происходящих при работе сервера или компьютера. Иногда употребляется русскоязычный аналог понятия — журнал. Прим. ред.

и потому его знания о пилотировании могут опираться на моторную память управления поводьями. У третьего те же знания хранятся в контексте видеоигр, которыми он увлекается с детства. Каждый по-своему усваивает навык пилотирования вертолета, поэтому невозможно составить стандартный набор инструкций для загрузки в любой мозг. Иными словами, «мозговые» инструкции по пилотированию вертолета, в отличие от компьютерных, не есть подгружаемый файл; напротив, эти знания прочно привязаны ко всему жизненному опыту, пережитому лично вами. Ранний опыт выстраивает в мозге внутренний город памяти, в котором каждый вновь прибывающий житель должен отыскать свой и только свой уникальный уголок<sup>27</sup>.

\*\*\*

Главное, что нам следует понять в послойно-разнотемповой системе, — взаимодействие между ее слоями. По мере прогресса в неврологии все больше клинических случаев, как я подозреваю, будут рассматриваться именно с позиций междуслойного взаимодействия в системе.

Вспомним еще раз адмирала Нельсона: хотя мушкетная пуля отстрелила ему руку и ее пришлось ампутировать, всю последующую жизнь он ощущал некое присутствие утраченной конечности. Несмотря на то что участок коры, прежде реагировавший на прикосновение к руке, стал реагировать на прикосновения к лицу, нижележащие области мозга сохраняли ожидания, что этот участок по-прежнему представляет руку. Проще говоря, медленные глубинные слои все еще прочитывали активность в нем как ощущения от руки. И, как часто бывает у перенесших ампутацию, возникает путаница восприятия в форме фантомной чувствительности: адмирал был уверен, что рука все еще существует, — так, во всяком случае, говорили ему глубинные слои мозга. Система с послойной динамикой наиболее эффективно функционирует при изменениях, протекающих нормальными темпами, а резкие, внезапные перемены в строении тела могут спровоцировать непредсказуемые реакции, особенно когда эти перемены происходят со скоростью мушкетной пули.

В качестве еще одного примера рассмотрим редкое состояние, называемое гипертимезией, которое проявляется в виде превосходной автобиографической памяти: человек абсолютно ничего не забывает. Назовите любую дату из его прошлого, и он расскажет, какая была в тот день погода, что он делал, во что был одет и кого видел. Когда нейробиология получит в свое распоряжение технологии, позволяющие проникнуть в самые истоки этого феномена (на нейронном и молекулярном уровнях), гипертимезию почти наверняка будут трактовать как

взаимодействие между слоями, при котором сстыковки происходят с необычной скоростью. В терминах общественной жизни это можно проиллюстрировать так: представьте, что кутюре возьмут себе слишком много власти и начнут навязывать свои дизайнерские причуды непосредственно слово управления. (Какой бы крутой нам ни казалась способность помнить все на свете, в реальности гипертиметики часто мучаются из-за невозможности забывать мелкие, несущественные подробности. Недаром Оноре де Бальзак однажды заметил: «Как ни украшают жизнь воспоминания, только забвение делает ее сносной».)

Наконец, рассмотрим еще один неврологический феномен — синестезию, состояние, при котором сигнал одной модальности вызывает автоматическое непроизвольное ощущение другой. Например, буква алфавита создает внутреннее ощущение какого-либо цвета, скажем буква J ассоциируется с фиолетовым, а W приводит на ум зеленый цвет (графемно-цветовая синестезия).

Согласно самой распространенной гипотезе синестезия отражает повышенное наложение сигналов между областями мозга, которые в норме не взаимодействуют. Но ранее я выдвигал другую гипотезу: синестезия представляет собой «вязкую пластичность»<sup>28</sup>. Представим, что ребенок увидел фиолетовую букву J (возможно, какой-то знак на стене школы или вышивку на пиджаке, а может, он сам выбрал фиолетовый мелок, чтобы написать эту букву). Как мы уже знаем, синапсы способны модифицировать свою силу, если их нейроны одновременно активны (скажем, те, что кодируют букву J, и кодирующие фиолетовый цвет). Они возбуждаются вместе, соответственно, и соединяются вместе. У большинства людей ассоциация между J и каким-либо цветом продолжит меняться от последующего вида этой буквы в различных тонах или цветах. Так, если мы увидим желтую J, связь между J и желтым цветом усиливается, а связь между J и фиолетовым ослабнет. Если мы долго смотрим на J разного цвета, парность J и цвета усредняется, не оставляя ассоциации между буквой и цветом. Предполагаю, что у синестетиков наблюдается атипичная пластичность. В частности, у них снижена способность модифицировать однажды установленную ассоциацию. Первоначальное сопряжение между буквой и цветом не меняется: какое сформировалось, такое и сохраняется.

Как это можно проверить? Каждый синестетик обычно раскрашивает алфавит не в те цвета, которые выбирает другой синестетик. Но тогда как узнать, имеет ли место импринтинг чего-то увиденного в детстве?

В целях проверки этой гипотезы я разработал онлайн-тест для выявления и количественной оценки синестезии — Synesthesia Battery<sup>29</sup>.

В ходе эксперимента были собраны и верифицированы данные тысяч синестетиков-добровольцев. Затем мы с двумя коллегами из Стэнфорда тщательно проанализировали цветные алфавиты 6588 участников. Результаты нас ошеломили. Хотя у большинства испытуемых ассоциации между буквами алфавита и цветами носили, в сущности, случайный характер, выявились также сотни синестетиков, выстроивших ассоциации примерно по одноковому шаблону: буква А была красной, В — оранжевой, С — желтой, Д — зеленой, Е — синей, F — фиолетовой, после чего цветовой цикл повторялся, начиная с красной G<sup>30</sup>. Но что еще удивительнее, все синестетики с данным ассоциативным шаблоном родились в период между концом 1960-х и концом 1980-х годов. В пределах данного временного окна подобную графемно-цветовую ассоциацию продемонстрировали свыше 15% синестетиков, причем у участников, родившихся ранее 1967 года, и почти у всех, рожденных позже 1990-х годов, такая ассоциация отсутствовала (рис. 10.3).



A	Красный	N	Оранжевый
B	Оранжевый	O	Желтый
C	Желтый	P	Зеленый
D	Зеленый	Q	Синий
E	Синий	R	Фиолетовый
F	Фиолетовый	S	Красный
G	Красный	T	Оранжевый
H	Оранжевый	U	Желтый
I	Желтый	V	Зеленый
J	Зеленый	W	Синий
K	Синий	X	Фиолетовый
L	Фиолетовый	Y	Красный
M	Красный	Z	Оранжевый

Рис. 10.3. У многих синестетиков, рожденных в период с конца 1960-х по конец 1980-х годов, ассоциации между буквами алфавита и цветами в точности повторяют раскраску букв в наборе алфавитных магнитиков на холодильник, которые выпускались фирмой Fisher-Price. Один из испытуемых представил фотографическое свидетельство того, что ему в детстве дарили магнитики Fisher-Price

Как выяснилось, именно в таком цветовом порядке были раскрашены буквы в алфавитном наборе магнитиков на холодильник, которые выпускались компанией Fisher-Price только в период с 1971-го по 1990 год и в те времена украшали все холодильники Америки. Причем причиной синестезии послужили не сами магнитики — они только дали пищу для ассоциации букв с цветами у людей, предрасположенных к этому состоянию<sup>31</sup>.

Синестезия, как и гипертилизия, отражает инерционность разделения слоев: быстрые слои быстрее, чем полагается, проталкивают свою информацию глубинным слоям. Хотя ни синестезия, ни гипертилизия не считаются заболеваниями, такие состояния статистически необычны и наводят на предположение, что скорость взаимодействия между разнотемповыми нейронными слоями у большинства нашей популяции оптимизирована эволюционным путем.

## Многоликая память

До сих мы обсуждали память, в целом подразумевая, что она одна и едина. На самом деле у памяти много ликов.

Возьмем хотя бы пример журналистки Джоди Робертс, которая в 1985 году жила и работала в штате Вашингтон. А однажды исчезла. Родные и близкие усердно разыскивали Джоди и после многолетних успешных поисков смирились с мыслью, что ее уже нет в живых.

Но Джоди очень даже была жива. Спустя пять дней после исчезновения она, как выяснилось много позже, оказалась в городе Аврора, за тысячу километров от дома. Дезориентированная, девушка потерянно бродила по торговому пассажу. При ней не было никаких документов, только ключи от машины, которую так и не нашли. Джоди абсолютно ничего не помнила о себе и своем прошлом: у нее была полная амнезия. Полицейские доставили ее в больницу, но Джоди так и не смогла вспомнить, кто она такая, и ей оформили новые документы на имя Джейн Ди. Новоявленная Джейн устроилась работать в ресторан фастфуда и поступила в Денверский университет. Через какое-то время она переехала в маленький городок на Аляске, где вышла замуж за местного рыбака, приобрела профессию дизайнера сайтов и родила детей — дважды по паре двойняшек.

Спустя 12 лет после исчезновения один знакомый узнал Джоди, прошматривая выпуск новостей. И Джейн Ди, в прошлом Джоди Робертс, наконец-то воссоединилась с рыдающими от счастья родными. Правда,

она совершенно не могла их вспомнить и держалась с ними учтиво, но отчужденно. Как позже рассказал в новостях ее отец, «в основе своей она осталась той же личностью, какой была. В каком-то смысле мы ее вернули»<sup>32</sup>.

Главное в этой истории то, что Джоди, как и многие другие потерявшиеся, утратив память о прошлом, тем не менее сохранила память о том, как изъясняться на родном языке, водить машину, кокетничать, получать работу, в чем заключается работа официантки, как писать любовные письма или заботиться о детях. Вот только свою биографию напрочь забыла.

При анализе подобных случаев (а их немало) напрашивается вывод о существовании многих типов памяти. Хотя на первый взгляд это вроде бы неочевидно, но память не есть единое целое, она включает в себя много разных подтипов. В более широком смысле память подразделяется на кратковременную (помнить названный кем-то номер телефона достаточное время, чтобы позже набрать его) и долгосрочную (например, что вы делали во время отпуска два года назад). В долгосрочной памяти можно выделить декларативную (эксплицитную) память (обеспечивает запоминание имен и фактов) в противовес недекларативной (процедурной) памяти (как ездить на велосипеде и прочие действия, которые вы могли бы выполнять, но не в состоянии сформулировать на словах). В недекларативной памяти выделяются несколько подкатегорий, например память о том, как быстро печатать на компьютере или почему от шуршания разворачиваемой конфетной обертки у вас текут слюнки (рис. 10.4).

В качестве первого шага к пониманию случая Джоди следует признать, что разные структуры мозга поддерживают разные типы обучения и памяти. Травма гиппокампа и прилежащих структур может помешать формированию новых порций декларативной памяти («Что я ела на завтрак?»), но не затронет память имплицитную (как говорить, петь, ходить). По этой причине страдавший амнезией Генри Молисон сохранил способность вести нормальную повседневную жизнь и помнил, как чистить зубы, водить машину или поддерживать разговор. При обучении моторным навыкам задействуются другие части мозга, особенно те, что отвечают за равновесие и координацию. Какие-то области мозга играют важную роль в связывании моторных действий с последующими вознаграждениями. Некоторые отделы важны для изменений памяти, связанных с обусловливанием страха, а различные структуры, отвечающие за вознаграждение, способствуют обучению успешным стратегиям добычи пропитания.

## Живой мозг



Рис. 10.4. Различные виды памяти

Перечень мозговых структур и их связей с обучением и памятью велик и постоянно пополняется, а случаи Генри и Джоди учат нас, что целостность определенной подсистемы необязательно важна для функционирования других. Можно лишиться способности помнить историю своей жизни, но это никак не повлияет на способность выучить и запомнить новые моторные навыки.

\*\*\*

Рассмотрим такой пример: с детства вы повидали много разных птиц, и ваш мозг вывел обобщение, что животные с перьями способны летать. Да, но вы также видели в зоопарке страусов и запомнили это конкретное исключение из правила. Наряду с этим вы могли узнать, что страусику в вашем зоопарке зовут Дора, однако это знание неприменимо ко всем другим страусам, которых вы могли видеть где-нибудь еще.

\* Классическое обусловливание (также известное как павловское или рееспондентное) — процедура обучения, формирования условно-рефлекторных реакций, при которой безусловный стимул (например, еда) сочетается с нейтральным стимулом (например, звуком колокольчика) до тех пор, пока нейтральный стимул не станет условным, то есть начнет вызывать условную реакцию (например, слюноотделение), такую же, как и безусловный стимул. *Прим. ред.*

\*\* Оперантное обусловливание — влияние последствий поведения на само поведение. *Прим. пер.*

\*\*\* Прайминг — механизм имплицитной памяти, обеспечивающий неосознанное и непреднамеренное влияние однократного воздействия стимула какого-либо вида на реакцию на последующий стимул. Например, слово «медсестра» распознается быстрее после слова «доктор», чем после слова «хлеб». *Прим. ред.*

\*\*\*\* Сенсибилизация — проявление нейропластичности, повышенная возбудимость центральных сенсорных нейронов. *Прим. ред.*

Несколько лет назад камнем преткновения для разработчиков искусственных нейронных сетей стала именно проблема различия обобщений и конкретных примеров. Они сумели разработать сети, обучавшиеся обобщениям («Существа с перьями летают») или содержащие коллекции примеров («Птица Дора летать не умеет, тогда как птица Пол летает»). А объединить эти две позиции не удалось: сеть либо медленно меняла свои параметры в результате предъявления ей тысяч примеров, либо меняла всё, причем мгновенно — сразу же, как только ей предъявили единичные примеры.

Как же получается, что единый мозг обучается разным вещам одновременно в обеих временных рамках, тем более что для запоминания разных типов информации о мире нужны разные временные шкалы. Иногда нужно сделать обобщение («Лимоны желтые»), в других случаях — запомнить конкретный факт («Лимон в отсеке для овощей в холодильнике совсем сгнил»).

Эта очевидная несовместимость целей дает важную подсказку<sup>33</sup>. Чтобы успешно решать обе задачи, мозг должен иметь разные системы, обеспечивающие разные скорости обучения: одна — чтобы выявлять в окружающей реальности общие закономерности (медленное обучение), другая — для эпизодической памяти (быстрое обучение). Согласно предположению, этими двумя системами служат гиппокамп и кора: гиппокамп скор на изменения (и потому быстро учится на примерах), тогда как кора должна потратить время, чтобы неспешно делать обобщения. Первый быстро меняется, удерживая конкретные подробности, а вторая меняется медленно и требует подкрепления множеством примеров. Такой трюк позволяет мозгу быстро обучаться на конкретных примерах («При нажатии этой кнопки запускается двигатель арендованной машины») и одновременно медленно извлекать статистические закономерности из приобретенного опыта («Большинство цветов распускаются весной»)<sup>34</sup>.

## История вносит свои корректизы

Когда активность проходит через мозг, его структура меняется. Для обширных массивов нейронных лесов в вашем черепе это колossalная организационная проблема: нервная система должна трансформироваться, чтобы оптимально отражать реалии мира. Каждое отдельное изменение должно внести правильный вклад в нейронную сеть, чтобы она вместила новое знание, причем изменения должны быть позиционированы

## Живой мозг

таким образом, чтобы в нужный момент повлиять на поведение. Нередкая ошибка упрощенчества при изучении памяти — полагать, будто в ее основе лежит единый механизм изменений. Классическая версия усиления и ослабления синапсов уже сослужила нам добрую службу: построенные на этих принципах искусственные нейронные сети способны решать прикладные задачи впечатляющей сложности. Но память не сводится к формированию цепочек синапсов в обширной схеме соединений: по мере притока новых данных простые синаптические модели быстро теряют способность представлять ранее поступившие данные. Деградация воспоминаний — а чем они старше, тем прочнее, — раскрывает нам секрет: существуют разные временные шкалы перемен.

Синаптическая модель удобна нейробиологам и разработчикам искусственных нейронных сетей, но Мать-природа почти наверняка руководствовалась другим подходом. Изменения в основе памяти широко распределены между колоссальными количествами нейронов, синапсов, молекул и генов. Аналогично пустыня хранит воспоминания о гуляющих по ее просторам ветрах: они запечатлены в крутизне барханов, в форме выветривания скальных образований, в характере действия эволюции, задавшего форму крыльышкам обитающих в этой природной зоне насекомых и листьям выживающих в ее суровых условиях растений.

Для достижения прогресса в области изучения памяти мы должны максимально реалистично подходить к феномену, который пытаемся здесь разъяснить. Хотя современные искусственные нейронные сети легко решают невероятной сложности задачи (вспомним их фантастическую способность различать фотографии), они еще далеко не овладели базовыми особенностями человеческой памяти. Ее богатство и многогранность, как я предполагаю, обусловлены биологическим каскадом временных шкал. Новая информация встраивается поверх старой, укладываясь в рамки ограничений, предлагаемых предыдущим опытом. Я знаю немало студентов-медиков, которые всерьез опасаются, что если они загрузят себе в память еще один новый факт, то он вытеснит что-то из выученного прежде. На их счастье, модель неизменного объема памяти ошибочна. Напротив, с каждой новой усвоенной порцией знания вы только улучшаете свою способность впитывать следующее знание по данной теме.

# ГЛАВА 11

## ПРО ВОЛКА И МАРСОХОД

Недавно читал об одной калифорнийской школе, где свернули программы по искусству, музыке и физической культуре. Зачем же понадобилось так обрезать бюджет? Оказалось, что несколько лет назад было решено направить все средства на создание супер-пупер-компьютерного центра для учащихся. Школьная администрация закупила компьютеры, серверы, мониторы и разнообразные периферии на \$330 млн. Затем образцово-показательный компьютерный класс-шедевр с большой помпой и всяческими церемониями предъявили восхищенной школьной общественности.

Прошло несколько лет, и сверхсовременное компьютерное «железо» начало устаревать. Появились более быстрые чипы, память перебазировалась с жестких дисков в облако, а новые программы оказались несовместимыми со старой прошивкой. Словом, не прошло и десяти лет, как администрации пришлось списать все это великолепие в утиль.

«Свет в окошке», предмет всеобщих восторгов, из-за которого школа лишилась уроков творчества и физкультуры, недолго радовал администрацию и учащихся и теперь громоздился на помойке горьким напоминанием о бесполезно потраченных средствах.

Эта история заставила меня призадуматься. В самом деле, зачем мы продолжаем строить машины жесткой конструкции, которые вскорости превращаются в утильсырье? Впаивая в нутро компьютера электронную схему, мы в тот же самый момент устанавливаем срок его годности.

Если бы мы прилежно учились у биологии ее сметке и прозорливости, то уже давно обратили бы себе на пользу принципы живых систем. Если волк попадает лапой в капкан, он отгрызает ее и продолжает жить трехногим. А вот марсоход Spirit, самоходный робот весом под 200 кг, 4 января 2004 года «приземлившись» на поверхность Красной планеты, годами успешно колесил по ее просторам, но в конце 2009 года увяз в марсианской почве и не смог выбраться — помимо прочего потому, что у него отказало правое переднее колесо. Солнечные панели намертво застрявшего Spirit не смогли сориентироваться по солнцу. Марсоход

## Живой мозг

лишился притока энергии и во время марсианской зимы понес невосполнимый урон. 22 марта 2010 года бедняга передал на Землю свою лебединую песню и испустил дух (рис. 11.1).

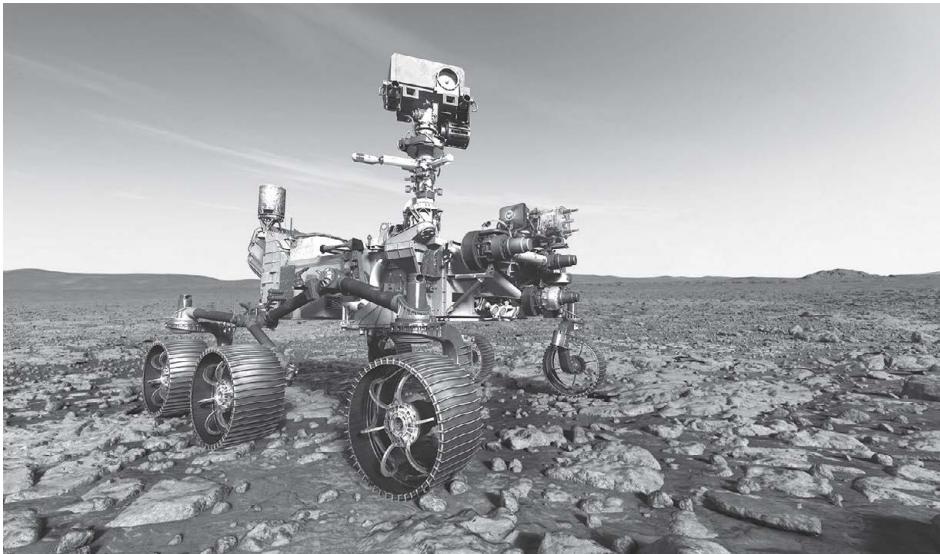


Рис. 11.1. Великолепный марсоход Spirit сегодня представляет собой груду внепланетного металломала стоимостью \$400 млн

Spirit героически отбыл отведенный ему срок жизни. Конечно, было бы сумасшествием послать на Марс колонии астронавтов, которые продержались бы всего несколько лет, прежде чем превратиться в груду костей.

Это не критика выдающихся конструкторов НАСА. Проблема в том, что мы продолжаем строить роботов с жестко смонтированными электронными схемами. Если современный робот потеряет колесо, погнет ось или у него сгорит часть материнской платы, его песенка спета. Но посмотрите на животное царство: его обитатели получают повреждения и все равно продолжают жить. Они будут хромать, еле волочить ноги, но предпочтут скакать на оставшихся конечностях, в той или иной степени утратить силу, претерпеть какие угодно невзгоды, лишь бы упрямо двигаться к своим целям.

Волк отгрызет попавшую в капкан лапу, и мозг приспособится к необычному плану его тела, потому что возврат чувства безопасности соответствует его системе вознаграждения. Ему нужны кровь, еда и поддержка стаи, и мозг быстро решает, как этого добиться.

Разница между самоходным роботом и волком упирается в выбор между информацией как таковой и информацией жизненно необходимой. В отличие от угодившего в капкан марсохода, волком движут наущные цели: избежать опасности и достичь безопасности. Его действия и намерения продиктованы угрозой нападения и требованиями желудка. Волк движется к собственным целям, и потому его мозг поглощает информацию не только об окружающей реальности, но и о том, на что способны его лапы, и преобразует эти способности в самые подходящие действия.

Волк готов хромать на трех лапах, потому что у животных не принято лечь и помереть от умеренного урона телу. Их примеру должны следовать наши машины.

Мать-природа знает, что не нужно жестко монтировать сеть в волчьем мозге, как и нет смысла жестко программировать сам мозг. С переменной плана тела и среды обитания меняются сложные взаимоотношения между способностями и действиями. Поэтому вместо заранее заданной схемы лучше создать инфотропную систему, которая на лету оптимизируется и самонастраивается на максимальную эффективность при достижении целей. Одни цели долгосрочные (выжить), другие — сиюминутные (выработать хватку, чтобы вцепиться в убегающего оленя); мозг во всех случаях настраивается на них.

Что нужно нашим роботам, чтобы сохранять работоспособность при повреждениях? Им потребуется умение активировать модифицированный план «тела» в сочетании с обеспечением необходимости питаться, общаться и выживать. Обладая такими характеристиками, они даже с отскочившим колесом или поврежденной деталью смогут адаптировать уцелевшие схемы, чтобы довести начатую задачу до конца. Представьте, что марсоход отпиливает застрявшее в грунте колесо и сам смеет, как двигаться на оставшихся колесах. Подобные принципы могут быть использованы при проектировании реконфигурирующихся машин, начинка которых соотнесет входные сигналы со своими целями и адаптирует к этому сочетанию свою систему управления. Когда они будут терять покрышки, ломать оси или рвать провода, сохранившаяся система перестроится должным образом, чтобы завершить выполнение задачи.

Для волка нет нужды в жестких схемах, как и для сестер Полгар, Ицхака Перлмана или Серены Уильямс. Мир слишком сложен, чтобы предвидеть все его коленца, и потому было бы невозможно спрограммировать гены так, чтобы они соответствовали всей многосложности мира. В конце концов, все в нем течет и меняется — тела, источники

пропитания, соответствия между ресурсами, способностями, результатами. Вместо заранее заданных схем лучше спроектировать систему, которая станет самостоятельно совершенствоваться и приспособливаться к изменившимся обстоятельствам для достижения своих целей.

\*\*\*

Десятилетиями науку о мозге помогали двигать вперед технические достижения, от осциллоскопов и электродов до магнитно-резонансных томографов. Возможно, пришло время развернуть наконец вектор влияния, чтобы инженерная наука могла опираться на принципы и достижения биологии.

Нынешнее высокотехнологичное оборудование производится в фантастически стерильных помещениях богатейших компаний мира; при этом разработчики в своих поисках далеки от аналогии с подвижными созданиями Матери-природы — от собак до дельфинов, от людей до колибри, от панд до панголинов\*. Им не требуется подключаться к электрической розетке, они находят собственные источники энергии, карабкаются, взбираются, бегают, прыгают, плавают, ползают и при некотором усилии способны освоить скейтборд, сноуборд или доску для серфинга. Все это возможно потому, что природа беспрестанно играет с генами, мастеря новые органы чувств и мышцы, а мозг сам соображает, как извлекать пользу из новых приспособлений. Живые существа способны перенести телесный урон — сломать ногу или лапу, лишиться полушария мозга — и при этом продолжать жить. Наши же нынешние устройства и приборы не обладают ни гибкостью, ни жизнестойкостью, свойственными живой природе.

Но почему же мы до сих пор не проектируем механизмы, основываясь на принципах пластичности мозга? Не будем к себе чрезмерно суровыми: в распоряжении Матери-природы имелись миллиарды лет, чтобы параллельно проводить триллионы экспериментов. Для нас почти непредставим временной горизонт подобного размаха, как непостижимо устройство мозга бесчисленных тварей, которые рождались на свет и топтали землю, ревились в водах или кружили в небесах.

Нам потребуется время, чтобы угнаться за природой. И очень хорошо, что мы уже начали взламывать коды вокруг нас.

---

\* Панголины, или ящеры (лат. Pholidota), — наземные и древесные млекопитающие, населяющие открытые местности и тропические леса Африки и Юго-Восточной Азии.  
Прим. ред.

Так как же нам исхитриться, чтобы встраивать принципы пластичности мозга в создаваемые нами устройства? Первое, что приходит на ум, — имитировать уже созданное природой. Вот хороший пример: тело мексиканской тетры, слепой рыбки, обитающей в подводных пещерах, сплошь покрывают сенсоры. Ориентируясь по перепадам давления воды и направлению течения, тетра умеет в непроглядной темени определять формы подводных объектов. Вдохновленные ее примером, сингапурские инженеры разработали искусственную версию сенсоров слепой тетры для подводных лодок<sup>1</sup>. Ни для кого не секрет, что освещение в подводных аппаратах требует массы энергии и губительно для подводных экосистем. Зато набор мелких маломощных сенсоров по образу и подобию тех, какими природа наделила слепую тетру, дают надежду «видеть» во тьме за счет движения вод.

Сенсорная биомимикрия — великолепный старт, но это только начало пути. Гораздо больший вызов — спроектировать нервную систему с plug-and-play периферией. Какая от этого польза? Рассмотрим для примера проблемы, с которыми постоянно сталкивается НАСА на Международной космической станции (МКС). Международное космическое сотрудничество — основа основ проекта. И в то же время — главная причина технической проблемы. Русские конструируют один модуль, американцы пристраивают другой, а китайцы — свой, китайский. В итоге постоянная головная боль МКС — координировать работу датчиков в модулях разных стран. Американские тепловые датчики не всегда синхронизируются с российскими датчиками вибраций, а китайские газоанализаторы с трудом сообщаются с остальными приборами и оборудованием станции. Проблемам нет конца, и МКС постоянно мобилизует инженеров на поиск все новых и новых решений.

Правильный выход из положения таков: чтобы раз и навсегда решить эту проблему проблем, надо взять пример с Матушки-природы. Разве не доказала она свою способность подгружать живым тварям тысячи новых органов восприятия — от ушей, глаз и носов до рецепторов давления, температуры, электрического и магнитного полей, не говоря обо всем прочем? За долгие времена эволюции природа затратила немало усилий на создание нервной системы, которая извлекает информацию из этих сенсоров без необходимости знать о них что бы то ни было (см. главу 4). Сенсоры могут быть разного вида и иметь разную конструкцию, что, однако, не мешает им работать в полном согласии и гармонии, потому что мозг, общаясь с миром, выискивает сопряжения между различными входными потоками данных и придумывает, как пустить в дело поступающую информацию.

Как воспользоваться преимуществами такого подхода? Вспомним, что один из самых действенных приемов мозга — произвести моторное действие и оценить, чем оно обернется. Я считаю, что надо позволить МКС экспериментировать не только с ее сенсориумом (совокупностью «органов чувств»), но и с ее моториумом, то есть с тем, как она использует свое «тело». В конце концов, МКС строится по модульному принципу, а это подразумевает, что план ее «тела» будет все время меняться. В каком бы теле ни осознал себя мозг, он найдет способ двигать им (см. главу 5), и предпрограммирования не потребуется, все моторные процессы будут происходить за счет проб различных «тедомирований» и оценки результатов. Именно таким образом наш мозг составляет представление о нашем теле. И подобным же способом МКС могла бы время от времени совершать серии малых движений, чтобы определить, какие дополнительные модули к ней пристыковали и как они дополняют ее двигательные возможности. Будущее идеи самоподстройки видится в том, что мы научимся проектировать машины не с постоянной, раз и навсегда закрепленной конструкцией, а способные самостоятельно завершать схемы своих подключений в ходе взаимодействия с реальностью.

Как только входные и выходные сигналы скоординируются, всевозможные чудеса не замедлят последовать. Рассмотрим для примера стандартный микрочип FPGA (программируемая пользователем вентильная матрица) в электронных мозгах множества знакомых нам устройств. Это потрясающий чип, но одна из основных проблем подобных микросхем — синхронизация всех сигналов внутри нее. Нули и единицы мелькают в чипах со скоростями, близкими к скорости света, и если бит из одной части чипа случайно опередит бит из другой, наступит катастрофа: вся логическая функция чипа окажется под угрозой. Тайминг в микрочипах выделился в отдельную подобласть, и на эту тему уже написаны объемные тома<sup>2</sup>.

Между тем с точки зрения биолога вопрос решается просто. Мозг и микрочип сталкиваются с одной и той же проблемой: постоянный приток входных сигналов (от органов восприятия, а также от внутренних органов) одновременно с потоком исходящих сигналов (движение конечностей). Правильное согласование во времени играет здесь огромную роль. Услышав, что хрустнула ветка до того, как вы поставили ногу на землю, насторожитесь: а вдруг это подкрадывается хищник? Если же вы слышите хруст после того, как ступили ногой на землю, это нормально, таково обычное следствие вашего действия, и оснований для паники нет. Трудность для мозга состоит в том, что невозможно заранее

запрограммировать ожидаемое время работы для отдельных органов чувств, поскольку оно имеет свойство меняться. Если вы с яркого света вступаете в темноту, скорость общения ваших глаз с мозгом замедляется почти на десятую долю секунды. В жару сигналы могут передаваться вдоль ваших конечностей быстрее, чем в холод. Когда вы растете, длина вашей конечности увеличивается, как и период прохождения сигналов туда и обратно.

Каким образом мозг решает проблемы синхронизации? Наверняка не штудирует толстенный том о верификации таймингов. Он действует методом проб и ошибок: что-то потрогает, что-то пнет, по чему-то стукнет. Он исходит из той посылки, что раз вы сгенеририровали действие (вступив во взаимодействие с реальностью), значит, рассредоточенная во времени информация, которая возвращается к нему через сенсорные каналы, должна восприниматься как синхронизированная с данным действием. Иначе говоря, ваше сознание должно приспособиться одновременно видеть, слышать и чувствовать последствия вашего действия<sup>3</sup>. Лучший способ предвидеть будущее — самому создавать его. Всякий раз, взаимодействуя с миром, ваш мозг посыпает разным органам восприятия четкий приказ: сверяйте часы.

Проблема тайминга в микрочипах решается посредством регулярной отправки пробных сигналов самому себе (точно так же, как человек мог бы попробовать мячик на прыгучесть, столовое серебро — на мелодичность звона или, надев очки, покрутить головой). Когда чип выступает в роли генератора пробного действия, у него могут возникнуть четкие ожидания относительно того, что должно последовать далее. И тогда он сам подстроится к ситуации, а нам не придется штудировать книги неимоверной толщины.

\*\*\*

Внедрив в механизмы принципы нейропластиичности, мы сможем создавать любые устройства, в частности беспилотные автомобили. В перспективе у нас появятся основания ожидать, что на дорогах станет меньше жертв ДТП — не только потому, что робомобили будут делиться друг с другом знаниями и общаться на трассе со своими «собратьями», но и в силу обучающих свойств системы в целом: чем дальше, тем больше беспилотные автомобили будут совершенствовать свои водительские качества. И дело не в том, что их специально запрограммируют на первых порах допускать промахи, чтобы учиться на них, — проблема в другом: окружающая реальность сама по себе сложна и многообразна и не все ситуации возможно предусмотреть заранее. Подобно тому

как подростки учатся на собственных ошибках и делятся друг с другом выстраданным опытом, робомобили со временем станут умнее и повышать класс вождения.

С помощью принципов построения нейронной сети мы сможем добиться гораздо более эффективного распределения электроэнергии, чем сейчас. Выстраивая интернет вещей (подсоединяя к Всемирной паутине бытовые устройства), мы получаем возможность маневрировать ресурсами колоссальных скопищ люстр, кондиционеров и компьютеров, а интернет возьмет на себя роль титанической нервной системы и станет подавать электричество туда и тогда, где и когда оно требуется<sup>4</sup>. Вдобавок к прочим благам умная электросеть даст возможность жителям частных домов самим обеспечивать себя электроэнергией. Представим, что к энергосети можно добавить ветровые генераторы и гелиоустановки тем же способом, каким Мать-природа добавляет живому существу новые периферические устройства, с тем чтобы мозг сам додумался, как их использовать. Помимо большей эффективности умная электросеть будет устойчива к атакам, поскольку сможет излечивать сама себя. Большинство стран заявляют, что работают над внедрением тех или иных версий умных энергосетей, но суть в том, что слово «умный» может означать разные градации интеллектуальности. Ваш сын-трехклассник умный мальчик, и Альберт Эйнштейн тоже умный. Так и мы будем медленно, но верно переходить от умных энергосетей к гениальным по мере постижения и практического применения принципов нейропластичности, которые создала за миллиарды лет Мать-природа.

Помимо преимуществ, которые получат созданные по принципу нейропластичности роботы-рoverы, автомашины, чипы и энергосети, я надеюсь увидеть также, как биология переписывает правила в других областях, скажем в архитектуре. Сегодня даже гениальные архитектурные сооружения бледнеют по сравнению со спроектированными природой — от необыкновенной красоты строения нейрона до изысканного дизайна мозжечка и восхитительной гибкости конечностей. Может быть, и архитекторы почерпнут вдохновение из биологии?

Представим себе здание, способное ощущать трафик через санузлы и высвобождать соответствующие репелленты или аттрактанты, чтобы быстро отрастить дополнительные канализационные трубы, унитазы, души и сифоны под раковины. Или вообразим жилой дом, который осознаёт собственную архитектуру и может приспособить свою «нервную систему» к перестройкам и перепланировкам: когда добавляется новая комната, в ней естественным образом прорастают электропроводка и воздухопроводы. «Мозг» дома адаптируется к подобным новшествам,

вырабатывая новое представление о том, как выглядит вверенное ему «тело». Аналогично, если часть дома пострадает от стихии, его «мозг» динамически перераспределит свои ресурсы: передислоцирует рабочее пространство и электропроводку из разрушенной кухни в другое место, чтобы функции приготовления и разогрева пищи хотя и на меньшей площади, но выполнялись. Возможно, в будущем мы столкнемся с фантомными болями холодильников, но это всяко лучше, чем иметь дело с ветхими постройками, стены которых вот-вот рухнут и положат конец вашей бренной жизни. А вдруг мы исхитримся спроектировать кирпичи, способные брать пример друг с друга и самостоятельно укладываться в то или иное строение — примерно так же, как соединяются отдельные нейроны, образуя более крупную структуру ядра. Или, например, представьте, что здания умеют сдвигаться с места, чтобы динамически оптимизировать уровень инсоляции, затенение, доступ к воде и ветровую нагрузку. Либо вообразите, что наши дома станут мобильными и смогут отходить в безопасное место, если по соседству вспыхнет пожар или береговая линия переместится в сторону суши. Перспективы развития инженерно-конструкторской деятельности станут безграничными, когда мы в полной мере постигнем принципы построения живой нейронной сети.

Возможности, которые открываются перед самоконфигурирующими устройствами, изменят сам смысл их ремонта. Строителя или автомеханика редко чем удивишь: если разрушится часть здания или что-то выйдет из строя в двигателе, специалисты хорошо представляют себе набор последствий. Зато начинающие неврологи далеко не настолько уверены в последствиях «поломок» в мозге. Конечно, они умеют распознавать и достаточно точно диагностировать то или иное расстройство, но лечебные мероприятия, к их огорчению, зачастую не дают результатов, о которых написано в учебниках. Но почему учебники зачастую идут вразрез с действительностью? Потому что каждый мозг следует по своей уникальной траектории, обусловленной его историей, анамнезом, целями и практикой. Представляется, что в далеком будущем строители и автомеханики станут в большей степени руководствоваться примером неврологов и нашупывать общие принципы, а не выискивать лопнувший болт или оборванный проводок.

\*\*\*

Чем больше мы будем прояснять принципы работы мозга, тем шире они станут применяться в самых разных областях — от искусственно-го интеллекта до архитектуры, от микрочипов до роботов-марсоходов.

## Живой мозг

Нам больше не придется исправлять огрехи в хрупких устройствах или загромождать ими свалки. Напротив, наш биологический мир, как и мир рукотворный, заполнят машины, способные сами себя перенастроить.

Подозреваю, что наши далекие потомки, оглядываясь на исторические перипетии промышленной революции, лишь в удивлении разведут руками: отчего нам потребовалось столько времени для достижения прогресса, когда этого можно было добиться гораздо раньше лишь за счет копирования принципов, в которых природа воплотила мудрость миллиардов лет эволюции.

И когда молодой человек спросит у вас, какими через полвека станут наши технологии, смело отвечайте: «Ответ — у тебя перед глазами».

# ГЛАВА 12

## НАЙТИ ДАВНО ПОЧИВШЮЮ ЛЮБОВЬ ЭТЦИ

В сентябре 1991 года двое путешественников из Германии наткнулись в Альпах на труп, точнее, только на голову и плечи, поскольку все, что ниже, вмерзло в ледник. Благодаря этому тело сохранилось и мумифицировалось в мерзлоте. Вроде бы ничего удивительного: в тех местах что ни год находили насмерть замерзших альпинистов, но эта находка оказалась совсем другого рода.

Обнаруженный мертвый мужчина замерз пять тысяч лет тому назад.

Его окрестили Тирольским ледяным человеком и даже дали ему имя — Этци. Тело в несколько заходов бережно вырубили изо льда, затем дождались, пока оно разморозится на месте обнаружения под действием ледяного горного воздуха, и только потом спустили на сооруженных из лыжных палок носилках. Пока власти Австрии и Италии в течение нескольких недель препирались по поводу принадлежности ценной находки, ученые пробрались к телу и определили, что Этци происходит из позднего неолита, а точнее — из медного века<sup>1</sup>.

И тут же начали появляться вопросы. Кем был этот человек? Как выглядел, что собой представлял? В каких краях бывал, где протекала его жизнь? Читая обильные словоизлияния ученых, я не уставал поражаться, сколько сведений можно по крупицам вытянуть из этих древних останков. Содержимое желудка Этци указывало, из чего состояли две последние в его жизни трапезы (два вида мяса, серны и оленя, в перемешку с пшеничными отрубями, кореньями и фруктами). Последняя трапеза содержала молодую пыльцу, из чего ученые заключили, что смерть наступила весной. Содержание микроэлементов в волосах Этци давало общее представление о его рационе в последние месяцы жизни, а по частичкам меди можно было предположить, что он имел отношение к ее выплавке. По составу зубной эмали оказалось возможным определить регион, где Этци провел детство. Судя по затемнениям в легких,

на стоянках он часто сиживал у костра. Пропорции костей ног указывали, что в молодые годы ему приходилось покрывать большие расстояния, причем в горных местностях. Судя по состоянию костей и соответствующим крестообразным точечным татуировкам на коже ног, он лечил свои изношенные колени примитивным иглоукалыванием. А по ногтям на пальцах рук можно было узнать о состоянии его здоровья: три попечные полоски свидетельствовали о том, что за полгода до смерти он трижды страдал системными заболеваниями.

Данные о теле могут раскрыть огромный объем сведений о его хозяине, поскольку состояние тела отражает накопленный опыт — как и конфигурация коры головного мозга (см. главу 6).

Когда-нибудь мы, вероятно, научимся определять главные вехи жизни человека — чем он занимался, что представляло для него важность — по конкретным особенностям строения его нейронных ресурсов. Не исключено, что эти изыскания положат начало новой отрасли науки. Быть может, изучая процесс самоконфигурации мозга, мы сумеем установить, в каких условиях человек жил, а может, даже поймем, что его волновало и заботило. Какую руку он задействовал в навыках, требующих тонких моторных движений? Какие сигналы внешней среды были для него важны? Какова структура языка, на котором он изъяснялся? Возможно, нам удастся получить ответы и на все прочие вопросы, что нереально сделать, просто разглядывая внутренности, волосы, ногти и колени.

Разве не этой логикой мы руководствуемся при реконструкции сбитых самолетов противников? Мы исходим из того, что функция непосредственно связана со структурой: если электропроводка в кабине пилотов имеет данную конфигурацию, значит, за этим стоит конкретный смысл. Такие же возможности открывает ретроспективное раскодирование мозга.

Если все пойдет правильным путем, где-нибудь через полвека мы снова придем к Тирольскому ледяному человеку, который хранится в запаянной стеклянной капсуле в Археологическом музее Больцано. И прочитаем подробности событий жизни Этци, непосредственно впечатанные в ткань его мозга. А то, чем он жил, поймем не со стороны и не по внешним признакам, а по его собственному восприятию. Что он считал важным в жизни? В каких заботах и волнениях проводил свои дни? Кого любил? То, что сегодня воспринимается как фантастика, через несколько десятилетий может стать наукой.

Нам уже известно, что в длительной перспективе эволюция создавала живых тварей в соответствии со средой их обитания.

Отметим, что фоторецепторы в сетчатке наших глаз идеально приспособлены к восприятию спектра солнечного света, а в геноме содержатся археологические записи о древнейших инфекционных заболеваниях. Но если брать значительно более короткий временной горизонт длиной в человеческую жизнь, то особенности мозговой организации могут рассказать о человеке намного больше: сама структура мозга отражает его заботы, занятия, которым он посвящал свое время, а также «горячие точки», где содержится вал информации о локальной среде его обитания. Таким образом можно не только составить характеристику Этци как представителя своей исторической эры, но и прочитать микроскопические «записи» в дневнике его жизни, запечатленные в клетках мозга. Мы смогли бы получить представление о лицах его братьев-сестер, детей, старших родичей, друзей и соперников, узнать, какие запахи втягивали его ноздри дождливыми ночами у костра на стоянке, услышать, как он говорит и как звучат знакомые ему голоса, пережить его личные радости, страхи, страдания разбитого сердца и надежды.

Не посчастливилось Этци жить во времена, когда он мог бы настроить видеокамеру и запечатлеть окружающую его реальность. Впрочем, ему это и не требовалось — он был сам себе видеокамера.

## У нас есть знакомые оборотни — это мы сами

Мне часто рассказывают истории чудесного исцеления: «Врачи сказали моей племяннице, что она больше никогда не сможет ходить. Но вы только посмотрите, как бодро она бежит по дорожке!» Во-первых, заявляю, что преклоняюсь перед пациенткой и ее семьей, которые справились с такой бедой. Во-вторых, у меня есть кое-какие сомнения в заключении лечащих врачей: вряд ли они действительно сказали «никогда», не предварив свой вердикт чем-нибудь вроде «самый вероятный сценарий...». Не исключаю также, что доктор просто хотел оградить себя от судебного иска и намеренно установил такую низкую планку ожиданий, поскольку любой прогресс в сравнении с ней будет оценен как благо. Но каковы бы ни были причины, хороший врач в подобных случаях редко позволяет себе категоричность суждений, памятая, что способность мозга к перенастройке дает шанс на исцеление, особенно у юных пациентов.

На мой взгляд, в биологии нет ничего более прекрасного, чем пластичность мозга. Я попытался выделить главные особенности этого явления в виде семи принципов.

- 1. Отражай реальность.** Всякий мозг подстраивается под поступающие в него входные данные.
- 2. Не пренебрегай любыми входящими сигналами.** Мозг умеет пустить в дело любые поступившие данные.
- 3. Задействуй любые органы.** Мозг обучается управлять вверенным ему телом, как бы оно ни было устроено.
- 4. Сохраняй ценное.** Мозг распределяет свои ресурсы, сообразуясь с актуальностью.
- 5. Изолируй стабильные данные.** В зависимости от характера входных данных одни части мозга проявляют больше гибкости, чем другие.
- 6. Конкурируй или умри.** Пластичность мозга есть результат борьбы компонентов системы за выживание.
- 7. Следуй за фактами.** Мозг выстраивает внутреннюю модель реальности и, обнаружив, что его предсказания не сбылись, тотчас же перестраивается.

Нейропластичность — не просто умопомрачительная выдумка природы, это ее коронный трюк, благодаря которому у нас есть память, гибкий интеллект, определенный уровень культуры. Секрет трюка в том, что мозг, обнаружив отсутствие инструмента для решения важной жизненной задачи, подстроится, чтобы смастерить его. Это свойство человеческого мозга — гениальная уловка, при помощи которой эволюция посредством естественного отбора расширила пространство возможностей. Над нейропластичностью не тяготеет необходимость предвидеть все и всякие обстоятельства, ибо мозг, столкнувшись с непредвиденным, сам на лету должным образом подстроит миллиарды своих параметров.

Мозг пластичен на всех уровнях, от синапсов до отделов. Постоянная борьба за нейронную территорию создает конкуренцию, в которой выживают самые приспособленные: за ресурсы воюет каждый синапс, каждый нейрон, каждая нейронная популяция. В ходе широкомасштабных конкурентных войн мозг перерисовывает свои карты так, чтобы его структура всегда отражала самые важные для организма цели.

Придет время, и нейропластичность станет привычным компонентом нашего мышления: по мере достижения реалий окружающего мира

нам все с большей ясностью будет раскрываться роль мозга практически во всех аспектах нашей жизни.

Вспомним, как к середине 1990-х годов в США резко сократился уровень преступности. Одна из гипотез связывает это с одним-единственным законодательным актом — Законом о чистом воздухе, который предписал автотранспорту переход с этилированного бензина на неэтилированный, то есть без добавки тетраэтилсвинца. В результате в воздухе уменьшилось содержание свинца, а через 23 года преступность резко пошла вниз. Как выяснилось, высокое содержание свинца в воздухе нарушает развитие детского мозга, побуждает к более импульсивному поведению, снижает способность к перспективному мышлению (осмыслинию последствий своих действий). Является ли взаимосвязь между содержанием свинца в воздухе и уровнем преступности совпадением? Скорее всего, нет. Другие страны тоже, хотя и в разное время, перешли на неэтилированный бензин, и везде спустя 23 года преступность снижалась — именно когда взрослели дети, выросшие в незагрязненной свинцом атмосфере<sup>2</sup>. Если эта гипотеза верна, значит, Закон о чистом воздухе внес больший вклад в борьбу с преступностью, чем любые другие политические решения за всю историю Соединенных Штатов. Хотя для подтверждения данной гипотезы требуются дальнейшие исследования, она подчеркивает важность идеи: на процесс развертывания живой нейронной сети могут исподволь влиять молекулы, гормоны и токсины. Если вы когда-нибудь сомневались в значении пластичности мозга, будьте уверены, что ее воздействие распространяется на все уровни социальной структуры: от отдельной личности до общества в целом.

\*\*\*

Благодаря нейропластичности каждый из нас представляет собой сосуд с образцами пространства и времени. Мы рождаемся в определенном месте нашей планеты и выбираем в себя подробности устройства и жизнедеятельности этого пространства. В сущности, мы превращаемся в записывающее устройство нашего пребывания в мире.

При знакомстве с каким-нибудь пожилым человеком вас, возможно, шокируют его мировоззрение или убеждения, но попробуйте поставить себя на его место. Станьте записывающим устройством данных из его временного окна и суммы его жизненного опыта. Настает день, и ваш мозг тоже превратится в замшелый стоп-кадр, что наверняка вызовет неминуемое раздражение у следующего поколения.

## Живой мозг

Вот крупица из пространственно-временного сосуда моей жизни: я помню песню 1985 года We Are the World («Мы — это мир»)\*, которую записали десятки музыкантов первой величины, чтобы направить средства от продажи сингла в помощь голодающим Африки. В песне говорится, что каждый из нас ответственен за благополучие всех живущих в нашем мире.

Вспоминая эту песню, не могу не поделиться с вами другой ее интерпретацией — с позиций нейрофизиолога. В целом мы идем по жизни с ощущением, что есть «я», а отдельно от меня есть мир. Но, и это мы уже обсудили, то, кто вы есть, ваша личность обретает форму в результате взаимодействия со средой обитания, багажом вашего опыта, с вашими друзьями, врагами, культурой, мировоззрением, эпохой — словом, со всем, что вас окружает. При всей похвальности таких аттестаций, как «он сам себе хозяин» или «она независима в своих суждениях», у вас на самом деле нет ни малейшей возможности обособить себя от всего богатства контекста, в который вы встроены. Не существует *вас* в отрыве и отдельности от *всего*. Это ваша внешняя среда сформировала ваши взгляды, убеждения и чаяния, все ваше существо снаружи и изнутри, как скульптор высекает свое творение из глыбы мрамора. Спасибо тебе, животворящая нейронная сеть нашего мозга: благодаря тебе каждый из нас и есть целый мир.

---

\* Авторы песни — Майкл Джексон и Лайонел Ричи. Прим. ред.

# ПРИМЕЧАНИЯ

Для лучшего понимания описываемых в книге идей и концепций я намеренно излагал их простым, общедоступным языком, не пользуясь принятым в нейробиологии профессиональным жаргоном. Данный подход, как и всякий другой, не лишен своих плюсов и минусов. Чтобы свести последние к минимуму, я снабдил книгу концевыми сносками, которые приведут заинтересованных читателей к оригинальным научным источникам, ознакомят с подробностями и научной терминологией.

## Глава 1

- 1 Из беседы автора с членами семьи Мэтью.
- 2 Как ни странно, но так оно и есть: операцию Мэтью провел хирург Бен Карсон, тот самый, кто в 2016 году решил баллотироваться на пост президента США от Республиканской партии, но позже вышел из гонки, проиграв Дональду Трампу.
- 3 Картина еще сложнее: кроме нейронов, в мозге есть и другие клетки, называемые *нейроглией*. Помимо прочего, нейроглия очень важна для долговременного функционирования нейронов, поскольку именно они обеспечивают быструю передачу информации. Всегда считалось, что мозг содержит вдвое больше глиальных клеток, чем нейронов; но благодаря новейшим методам исследования (например, изотропному фракционированию) мы знаем, что глиальных клеток в мозге ровно столько же, сколько нейронов. См. Von Bartheld CS, Bahney J, Herculano-Houzel S (2016). The search for true numbers of neurons and glial cells in the human brain: A Review of 150 Years of Cell Counting, *J Comp Neurol* 524 (18): 3865–3895. Общие представления о количествах см. также Gordons. *The synaptic organization of the brain* (New York: Oxford University Press, 2004).
- 4 Вот только маленько подмножество совокупности впечатлений, получаемых двухлетним ребенком в течение дня, которые непостижимым образом намечают траекторию его будущего жизненного пути. Малыш слушает рассказ про мальчика с длинным хвостом, которым тот прихлопывает мух (реальная история). В гости заходит подруга матери, Жозетт, и приносит серебристую кастрюлю, где на пару доходят приготовленные ею тефтели. За окном по улице с улюлюканьем проносятся на велосипедах трое мальчишек постарше. Ребенок видит, что белая кошка устроилась поспать на теплом капоте пикапа. Мама говорит папе: «Совсем как тогда, в Нью-Мексико», — и оба смеются. Папа стоит над

раковиной в кухне, поедая брюссельскую капусту из пластикового контейнера, и что-то говорит с полным ртом. Мальчик прижимается щекой к прохладным половицам дубового пола. Он видит, как на улице здоровенный дядька в костюме бобра раздает арахисовые орешки. И прочее, и прочее. Каждое из впечатлений добавляет по очередной крупице к его личности, и будь эти впечатления чуть-чуть другими, мальчик вырос бы чуть-чуть другим человеком. Подобные соображения могли бы с полным основанием встревожить родителей, если те считают своим долгом дать ребенку правильное направление в жизни. Впрочем, если учитывать бескрайние просторы океана всевозможных впечатлений, сколько-нибудь сознательная навигация по его акватории не представляется возможной. Вы не можете знать, какой эффект возымеет выбор той или иной книги, принятое решение или внешнее воздействие. Жизненная траектория человека — даже на протяжении одного-единственного дня — слишком сложна и прихотлива, чтобы предсказать, как и что может повлиять на нее. И хотя сказанное нисколько не умаляет значения родительских обязанностей и забот, совершенная невозможность предугадать, каким будет жизненный путь их ребенка, пускай и на малую малость, но все же облегчает им бремя ответственности.

- 5 Nishiyama T (2005), *Swords into plowshares: civilian application of wartime military technology in modern Japan, 1945–1964* (PhD diss., Ohio State University).
- 6 Главный аргумент на данную тему приведен в книге Eagleman DM (2011). *Incognito: the secret lives of the brain* (New York: Pantheon). Издание на русском языке: Иглмен Д. *Инкогнито: тайная жизнь мозга*. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2019.
- 7 Вопрос о границах понятия пластиичности все еще обсуждается. Сколько времени должны продлиться перемены, чтобы меняющийся объект подпадал под определение «пластиичный»? Возможно ли отделить пластиичность от таких понятий, как созревание, предрасположенность, гибкость и эластичность? Самы по себе семантические споры лежат несколько в стороне от темы данной книги, тем не менее для интересующихся я привожу здесь некоторые подробности. Одно из направлений дебатов касается вопроса, когда уместно применять термин *пластиичность*. Считать ли результат пластиичности в ходе развития, фенотипической и синаптической пластиичности проявлениями одного и того же феномена или следует отнести это понятие к разряду терминов, неряшливо употребляемых в различных контекстах? Насколько мне известно, первым к этому вопросу напрямую обращался Жак Пайяр в очерке 1976 года *Réflexions sur l'usage du concept de plasticité en neurobiologie* («Размышления об употреблении понятия “пластиичность” в нейробиологии»), который в 2008 году с комментариями перевел на английский язык Бруно Уилл с коллегами. Вторая Пайяру, они предположили в статье от 2008 года, что корректный пример пластиичности должен содержать как структурные, так и функциональные изменения (а не либо те, либо другие) и также должен быть отличим от гибкости (скажем, от предопределенной адаптации), достижения зрелости (скажем, от нормального

созревания организма) и эластичности (кратковременных перемен, которые в конечном счете возвращают объект к исходному состоянию). Как мы увидим в следующих главах, различить эти явления не всегда возможно. В качестве одного из подобных примеров, в главе 10, мы будем изучать, как меняется мозг во многих различных временных масштабах и каким образом перемены могут по цепочке передаваться разным частям системы (например, с молекулярного уровня на более высокий уровень молекулярной архитектуры). В свете сказанного возникает вопрос: если мы с помощью современных технологий выявили перемену, после которой система в итоге вернулась к исходному состоянию, но сделали такой вывод только потому, что наши возможности не позволяют одновременно измерить все эффекты, следует ли заключить, что исследуемая система всего лишь эластична, но не подходит под определение «пластичная»? лично мне представляется неразумным привязывать наши семантические definicijii к нынешним технологиям.

Споры вокруг понятия *пластичность* нередко сводятся к бурям в стакане воды. В контексте данной книги нам важнее всего разобраться, как примерно 1,3 кг футуристической технологии в нашем черепе умудряются самомодифицироваться. Если к концу книги вы хорошо это поймете, я буду считать, что справился со своей задачей.

- 8 Мэтью прихрамывает на ногу, противоположную удаленному полушарию, поскольку каждое из полушарий отвечает за противоположную сторону тела. Остаточная хромота обусловлена тем, что сохранившееся полушарие мозга Мэтью только отчасти, а не полностью сумело взять на себя двигательную функцию удаленного полушария.

## Глава 2

- 1 Gopnik A, Schulz L (2004). Mechanisms of theory formation in young children, *Trends Cogn Sci* 8: 371–377.
- 2 Spurzheim J (1815). *The physiognomical system of drs. Gall and Spurzheim*, 2nd ed. (London: Baldwin, Cradock and Joy).
- 3 Darwin C (1874). *The Descent of man* (Chicago: Rand, McNally).
- 4 Bennett EL et al. (1964). Chemical and anatomical plasticity of brain, *Science* 164: 610–619.
- 5 Diamond M (1988). *Enriching Heredity* (New York: Free Press).
- 6 Rosenzweig MR, Bennett EL (1996). Psychobiology of plasticity: Effects of training and experience on brain and behavior, *Behav Brain Res* 78: 57–65; Diamond M (2001). Response of the brain to enrichment, *An Acad Bras Ciênc* 73: 211–220.
- 7 Jacobs B, Schall M, Scheibel AB (1993). A quantitative dendritic analysis of Wernicke's area in humans. II. Gender, hemispheric, and environmental factors, *J Comp Neurol* 327: 97–111. И тут вы зададите мне резонный вопрос, в какую сторону направлен вектор причинно-следственной связи: разве не могли эти более качественные

## Живой мозг

дendриты развиться не в результате учебы, а наоборот, помогли их обладателям выдержать вступительные испытания в колледж? Хороший вопрос. У нас еще не проводилось экспериментов, которые могли бы прояснить его. Зато в последующих главах мы увидим, что сегодня у нас есть возможность замерять, как меняется мозг непосредственно в процессе обучения новому, в том числе жонглированию, музыке, судовождению и прочему.

- 8 Первоначально в рамках проекта «Геном человека» ученые насчитали порядка 24 тысяч генов; позже их число значительно снизилось — до 19 тысяч. См. Ezkurdia I et al. (2014). Multiple evidence strands suggest that there may be as few as 19,000 human protein-coding genes, *Hum Mol Genet* 23 (22): 5866–5878.
- 9 В последующих главах мы рассмотрим данную тему более глубоко и подробно. Хотя зависимость и независимость от опыта представляются противоположностями, между ними не всегда можно провести четкую грань. См. Cline H (2003). Sperry and Hebb or vinegar?, *Trends Neurosci* 26 [12]: 655–661. В одних случаях жестко запрограммированные механизмы воспроизводят опыт взаимодействия с миром, тогда как в других случаях подобный опыт ведет к экспрессии генов, что, в свою очередь, приводит к образованию новых жестких схем. Рассмотрим, как выглядит картина явной опытоависимой активности: первичная зрительная кора содержит перемежающиеся полосы ткани, которые несут визуальную информацию от правого и от левого глаза (подробнее об этом поговорим ниже). Аксоны, передающие информацию от каждого глаза, изначально широко ветвятся в коре, а потом разделяются, направляясь в два участка, отдельные для правого и левого глаза. Откуда они знают, как им разойтись? Дело в том, что разделение возникает в силу паттернов сопряженной активности: у нейронов левого глаза обычно наблюдается больше взаимной сопряженности, чем у нейронов правого.

В середине 1960-х годов нейробиологи из Гарвардского университета Дэвид Хьюбел и Торстен Визель показали, что под действием опыта карта равномерного чередования полос способна меняться: если животному закрыть один глаз, территория, занимаемая нервыми волокнами открытого глаза, будет расширяться, и это демонстрирует, что в условиях синаптической конкуренции, которая формирует эти карты, необходима нейронная активность. См. Hubel DH, Wiesel TN (1965). Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint, *J Neurophysiol* 28: 1041–1059).

Однако во всем этом определенно крылась загадка, поскольку, как ранее наблюдали Хьюбел и Визель, формирование чередующихся территорий для левого и правого глаза не зависит от активности: подобные паттерны развивались даже у выросших в полной темноте животных. См. Horton JC, Hocking DR [1996]. An adult-like pattern of ocular dominance columns in striate cortex of newborn monkeys prior to visual experience, *J Neurosci.* 16 [5]: 1791–1807. Как же согласуются эти два результата, когда они явно противоречат один другому?

Понадобились годы, чтобы разгадать этот парадокс. Как обнаружилось, пока животное развивается в материнской утробе, в сетчатке его глаз возникают волны

спонтанной активности. Эти волны в общих чертах имитируют зрение. Они грубые — не позволяют различать границы и детали, однако их достаточно для со-пряжения активности соседних волокон, тянувшихся от каждого глаза, что вызывает разделение на два отдельных глаза в следующих областях мозга (таких как, например, латеральное коленчатое тело таламуса, а также кора головного мозга). Иными словами, на раннем этапе развития мозг сам генерирует активность, чтобы поддержать расхождение аксонов левого и правого глаза; позже в действие вступят зрительные потоки от внешнего мира. См. Meister M et al. (1991). *Synchronous bursts of action potentials in ganglion cells of the developing mammalian retina*, Science 252 (5008): 939–943. Таким образом, граница между приобретаемым опытом и генетически заложенной нейронной активностью довольно-таки размыта. Взаимодействие между опытом и экспрессией генов бывает довольно сложным. Общий принцип в том, что независимые от опыта молекулярные механизмы выстраивают первоначально неточные схемы структур мозга. Позже активность взаимодействия с миром обеспечивает тонкую настройку нейронных связей. Мы больше не можем воспринимать мозг либо как результат работы генов, либо как плод взаимодействия с миром, потому что иногда гены имитируют опыт. Механизмы, зависящие и не зависящие от опыта, тесно переплетены.

- 10 Leonhard K (1970). *Kaspar Hauser und die moderne Kenntnis des Hospitalismus*, Confin Psychiatr 13: 213–229.
- 11 DeGregory L (2008). *The girl in the window*, St. Petersburg Times. Добавлю, что в последние годы у Даниэль отмечаются некоторые улучшения. Она научилась пользоваться туалетом, понимает, что ей говорят, и даже способна на вербальные ответы, хотя и в ограниченных пределах. Недавно она посещала младшую группу детского сада и училась обводить буквы. Это добрые и отрадные признаки; к несчастью, по-прежнему мало надежды, что девочка сколько-нибудь существенно нагонит в развитии и восполнит пробелы, образовавшиеся в первые трагические годы ее жизни.  
И вот еще что хотелось бы отметить. У детей, подобно Даниэль растущих в условиях стресса и депривации, как правило, наблюдается значительное отставание в росте; этот феномен называют психологической карликовостью. Как будто в насмешку, в 1990-е годы один деятель от медицины попытался ввести для него новый термин: синдром Каспара Хаузера. См. Money J (1992). *The Kaspar Hauser syndrome of “psychosocial dwarfism”: Deficient statural, intellectual, and social growth induced by child abuse*, Prometheus Books, 1992. Выбор крайне неудачный, если учсть, что Хаузер почти наверняка выдумал, что рос в одиночестве и дикости.
- 12 К счастью, ныне действующие протоколы по защите прав животных запрещают проводить подобные исследования. Но даже в те времена живодерские эксперименты Харлоу приводили в ужас многих его коллег, и это сильно повысило градус движения в защиту прав животных в США. Один из критиков Харлоу, Уэйн Бут, писал, что эксперименты доказывают лишь «то, что все мы и так знаем наперед: социальные существа можно уничтожить, если оборвать их социальные связи».

## Глава 3

- 1 Penfield W (1952). Memory mechanisms, AMA Arch Neurol Psychiatry 67 (2): 178–198; Penfield W (1961). Activation of the Record of Human Experience, Ann R Coll Surg Engl 29 (2): 77–84.
- 2 Кора головного мозга представляет собой его внешний слой толщиной около 3 мм. Ее еще называют серым веществом, поскольку ее клетки имеют более темный оттенок по сравнению с расположенным ниже белым веществом. У крупных животных она обычно собрана в складки (извилины), разделенные бороздами. Часть коры, в которой Пенфилд впервые обнаружил отвечающие за разные части тела участки, носит название соматосенсорной коры, которая отвечает за ощущения, поступающие от тела, или сомы.
- 3 Ettlin D (1981). Taub denies allegations of cruelty, Baltimore Sun, Nov. 1, 1981.
- 4 Pons TP et al. (1991). Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques, Science 252: 1857–1860; Merzenich M (1998). Long-term change of mind, Science 282 (5391): 1062–1063; Jones EG, Pons TP (1998). Thalamic and brainstem contributions to large-scale plasticity of primate somatosensory cortex, Science 282 (5391): 1121–1125; Merzenich M et al. (1984). Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys, J Comp Neurol 224: 591–605.
- 5 Помимо коры значительную реорганизацию претерпели и другие области головного мозга, в том числе таламус и стволовой отдел; к этим темам мы еще вернемся.
- 6 Knight R (2005). The Pursuit of victory: the life and achievement of Horatio Nelson (New York: Basic Books).
- 7 Mitchell SW (1872). Injuries of nerves and their consequences (Philadelphia: Lippincott).
- 8 Все началось с магнитоэнцефалографии (МЭГ), которая открыла возможность измерять и визуализировать магнитные поля, создаваемые электрической активностью мозга; вскоре удалось перейти к функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ). Подробнее обзор методов функциональной визуализации см. Eagleman DM, Downar J (2015). Brain and behavior (New York: Oxford University Press).
- 9 Фантомные боли свидетельствуют о том, что, когда мозг перерисовывает свои карты, изменения отображаются на них не во всей полноте: хотя нейроны, прежде отвечающие за кисть руки, стали отвечать за лицо, нейроны нижележащих слоев все еще «думают», что получают информацию от кисти. В результате подобной путаницы индивид после ампутации обычно ощущает боли в фантомной конечности. В целом вследствие кортикальных изменений большого масштаба он испытывает более сильные фантомные боли. См. Flor et al. (1995). Phantom-limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation, Nature 375 (6531): 482–484; Karl A et al. (2001). Reorganization of motor and somatosensory cortex in upper extremity amputees with phantom limb

- pain, *J Neurosci* 21: 3609–3618. Выяснив, что различные области мозга трансформируются с различной скоростью, мы сумеем лучше разобраться с фантомными болями.
- 10 Singh AK et al. (2018). Why does the cortex reorganize after sensory loss?, *Trends Cogn Sci* 22 (7): 569–582; Ramachandran VS et al. (1992). Perceptual correlates of massive cortical reorganization, *Science* 258: 1159–1160; Barinaga M (1992). The brain remaps its own contours, *Science* 258: 216–218; Borsook D et al. (1998). Acute plasticity in the human somatosensory cortex following amputation, *Neuroreport* 9: 1013–1017.
- 11 Weiss T et al. (2004). Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block, *Eur J Neurosci* 20: 3413–3423.
- 12 Clark SA et al. (1988). Receptive-fields in the body-surface map in adult cortex defined by temporally correlated inputs, *Nature* 332: 444–445.
- 13 Правило Хебба было предложено в 1949 году. Hebb DO (1949). The organization of behavior (New York: Wiley & Sons). Часто оно оказывается немного сложнее: если нейрон А срабатывает непосредственно перед нейроном В, то связь между ними усиливается; если А срабатывает сразу после В, — ослабляется. Это явление известно как пластичность, зависящая от времени всплеска.
- 14 Есть также генетические причины, влияющие на формирование карты тела; например, расположение головы на одном конце карты, а ступней на другом зависит от того, каким образом нервные волокна прикрепляются к телу.
- 15 Исторической справедливости ради стоит отметить, что Луизиана сначала отошла к Испании. В 1802 году Испания вернула Луизиану Франции. А Наполеон в 1803 году продал ее Соединенным Штатам, поскольку к тому времени расстался со своими мечтами о Новом Свете.
- 16 Elbert T, Rockstroh B (2004). Reorganization of human cerebral cortex: the range of changes following use and injury, *Neuroscientist* 10: 129–141; Pascual-Leone A et al. (2005). The plastic human brain cortex, *Annu Rev Neurosci* 28: 377–401; D'Angiulli A and Waraich P (2002). Enhanced tactile encoding and memory recognition in congenital blindness, *Int J Rehabil Res* 25 (2): 143–145; Collignon O et al. (2006). Improved selective and divided spatial attention in early blind subjects, *Brain Res* 1075 (1): 175–182; Collignon O et al. (2009). Cross-modal plasticity for the spatial processing of sounds in visually deprived subjects, *Exp Brain Res* 192 (3): 343–358; Bubic A, Striem-Amit E, Amedi A (2010). Large-scale brain plasticity following blindness and the use of sensory substitution devices, in *Multisensory Object Perception in the Primate Brain*, ed. MJ Naumer and J Kaiser (New York: Springer), 351–380.
- 17 Amedi A et al. (2010). Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans, *Restor Neurol Neurosci* 28 (2): 143–156; Sathian K, Still R (2010). Cross-modal plasticity of tactile perception in blindness, *Restor Neurol Neurosci* 28 (2): 271–281. Обратите внимание, что эта трансформация может проявляться и другими путями: например, импульс магнитной стимуляции затылочной доли коры у незрячего читателя набранной шрифтом Брайля книги создаст тактильные ощущения в пальцах (притом что у зрячего индивида подобный

- магнитный импульс не дает такого же эффекта). См. Ptito M et al. (2008). TMS of the occipital cortex induces tactile sensations in the fingers of blind braille readers, *Exp Brain Res* 184 (2): 193–200.
- 18 Hamilton R et al. (2000). Alexia for braille following bilateral occipital stroke in an early blind woman, *Neuroreport* 11 (2): 237–240.
  - 19 Адаптированный рисунок из Renier et al. (2010).
  - 20 Voss P et al. (2006). A positron emission tomography study during auditory localization by late-onset blind individuals, *Neuroreport* 17 (4): 383–388; Voss P et al. (2008). Differential occipital responses in early-and late-blind individuals during a sound-source discrimination task, *Neuroimage* 40 (2): 746–758. Во втором эксперименте, описанном в данной статье, участники угадывали, где располагается источник звука, и при этом обнаруживался тот же феномен: активировалась зрительная кора.
  - 21 Renier L, De Volder AG, Rauschecker JP (2014). Cortical plasticity and preserved function in early blindness, *Neurosci Biobehav Rev* 41: 53–63; Raz N, Amedi A, Zohary E (2005). V1 Activation in congenitally blind humans is associated with episodic retrieval, *Cereb Cortex* 15: 1459–1468; Merabet LB, Pascual-Leone A (2010). Neural Reorganization Following Sensory Loss: The opportunity of change, *Nat Rev Neurosci* 11 (1): 44–52.  
Замечу, кстати, что можно проследить, как данная связь работает в противоположную сторону: если у незрячего индивида активность затылочной доли временно нарушена (в результате магнитной стимуляции), у него возникнут трудности с чтением шрифта Брайля и с обработкой вербальной информации (verbal processing). См. Amedi A et al. (2004). Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects, *Nat Neurosci* 7: 1266.
  - 22 Этот участок называется визуальной областью словоформы (visual word form area, или VWFA). См. Reich L et al. (2011). A ventral visual stream reading center independent of visual experience, *Curr Biol* 21: 363–368; Striem-Amit E et al. (2012). Reading with sounds: sensory substitution selectively activates the visual word form area in the blind, *Neuron* 76: 640–652.
  - 23 Это так называемая срединная височная зрительная область (middle temporal visual area, или MT). См. Ptito M et al. (2009). Recruitment of the middle temporal area by tactile motion in congenital blindness, *Neuroreport* 20: 543–547; Matteau I et al. (2010). Beyond visual, aural and haptic movement perception: hMT+ is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals, *Brain Res Bull* 82: 264–270.
  - 24 Данную область обозначают как LOC (Lateral Occipital Cortex — латеральная затылочная кора). См. Amedi et al. (2010).
  - 25 Мы вправе перефразировать этот тезис так: мозг можно назвать метамодальным оператором. «Метамодальный» означает, что производимые операции независимы от сенсорной модальности (а зависимы именно от того, по какому сенсорному каналу поступила информация). См. Pascual-Leone A, Hamilton R

- (2001). The metamodal organization of the brain, *Prog Brain Res* 134: 427–445; Reich L, Maidenbaum S, Amedi A (2011). The brain as a flexible task machine: implications for visual rehabilitation using noninvasive vs. invasive approaches, *Curr Opin Neurol* 25: 86–95. См. также Maidenbaum S et al. (2014). Sensory Substitution: Closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation, *Neurosci Biobehav Rev* 41: 3–15; Reich L et al. (2011). A ventral visual stream reading center independent of visual experience, *Curr Biol* 21 (5): 363–368; Striem-Amit E et al. (2012). The large-scale organization of “visual” streams emerges without visual experience, *Cereb Cortex* 22 (7): 1698–1709; Meredith MA et al. (2011). Crossmodal reorganization in the early deaf switches sensory, but not behavioral roles of auditory cortex, *Proc Natl Acad Sci USA* 108 (21): 8856–8861; Bola Ł et al. (2017). Task-specific reorganization of the auditory cortex in deaf humans, *Proc Natl Acad Sci USA* 114 (4): E600–E609. Обзоры см. в Bavelier and Hirshorn (2010) и Dormal, Collignon (2011).
- 26 Finney EM, Fine I, Dobkins KR (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf, *Nat Neurosci* 4 (12): 1171–1173; Meredith MA et al. (2011).
- 27 Elbert, Rockstroh (2004); Pascual-Leone et al. (2005).
- 28 Hamilton RH, Pascual-Leone A, Schlaug G (2004). Absolute pitch in blind musicians, *Neuroreport* 15: 803–806; Gougoux F et al. (2004). Neuropsychology: pitch discrimination in the early blind, *Nature* 430 (6997): 309.
- 29 Voss et al. (2008).
- 30 Бен скончался в 2016 году (по ряду источников в 2009-м, родился в 1992-м) в возрасте 16 лет вследствие рецидива рака, поразившего его глаза.
- 31 Extraordinary People: The boy who sees without eyes. Season 1, episode 43, Jan. 29, 2007.
- 32 Teng S, Puri A, Whitney D (2012). Ultrafine spatial acuity of blind expert human echolocators, *Exp Brain Res* 216 (4): 483–488; Schenkman BN, Nilsson ME (2010). Human echolocation: blind and sighted persons’ ability to detect sounds recorded in the presence of a reflecting object, *Perception* 39 (4): 483; Arnott SR et al. (2013). Shape-specific activation of occipital cortex in an early blind echolocation expert, *Neuropsychologia* 51 (5): 938–949; Thaler L et al. (2014). Neural correlates of motion processing through echolocation, source hearing, and vision in blind echolocation experts and sighted echolocation novices, *J Neurophysiol* 111 (1): 112–127. Кроме того, у незрячих людей, освоивших метод эхолокации, активируется скорее зрительная кора, чем слуховая, когда они улавливают отражение звуков: Thaler L et al. (2011). Neural correlates of natural human echolocation in early and late blind echolocation experts, *PLoS One* 6 (5): e20162. Эхолокацию можно улучшить при помощи технологий: в ряде новых разработок на очки устанавливают ультразвуковой сенсор, замеряющий расстояние до ближайшего объекта и преобразующий его в четко различимый звуковой сигнал, разные тона которого указывают на разные расстояния.
- 33 Griffin DR (1944). Echolocation by blind men, bats, and radar, *Science* 100 (2609): 589–590.

## Живой мозг

- 34 Amedi A et al. (2003). Early “visual” cortex activation correlates with superior verbal-memory performance in the blind, *Nat Neurosci* 6: 758–766.
- 35 Иными словами, задачу различения оттенков серого берет на себя участок зрительной коры, который у людей без данной особенности предназначен для серого и других цветов.
- 36 Kok MA et al. (2014). Cross-modal reorganization of cortical afferents to dorsal auditory cortex following early-and late-onset deafness, *J Comp Neurol* 522 (3): 654–675; Finney EM et al. (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf, *Nat Neurosci* 4 (12): 1171.
- 37 При аутизме области мозга растут разными темпами, что, видимо, инициирует образование аномальных связей, и в итоге нейронные пути в мозге аутиста слегка различаются, что приводит к нарушениям речи. См. Redcay E, Courchesne E (2005). When is the brain enlarged in autism? A meta-analysis of all brain size reports, *Biol Psychiatry* 58: 1–9. Иными словами, нейронные связи мозга могут распаковываться из одиночной клетки, но способ — конкретный ритм и порядок ее «монтажа» — всякий раз приводит к разному результату. Следует отметить, что теории относительно причин аутизма весьма разнообразны: одни винят дисфункцию системы зеркальных нейронов, другие — вакцинацию, или недостаточность соединений, или слабость основных связей — и это далеко не все теории. Так что необычное перераспределение кортикальной поверхности, по всей видимости, описывает разве что часть причин аутизма. Тем не менее рекомендую ознакомиться с примерами, скажем, в Boddaert N et al. (2005). Autism: functional brain mapping of exceptional calendar capacity, *Br J Psychiatry* 187: 83–86; LeBlanc J, Fagioli M (2011). Autism: a “critical period” disorder? *Neural plasticity*. 2011: 921680.
- 38 Voss et al. (2008).
- 39 Pascual-Leone A, Hamilton R (2001). The metamodal organization of the brain, in *Vision: from neurons to cognition*, ed. C Casanova and M Ptito (New York: Elsevier Science), 427–445.
- 40 Merabet LB et al. (2008). Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch, *PLoS One* 3 (8): e3046. Ранняя версия этих результатов опубликована в Pascual-Leone and Hamilton (2001).
- 41 Merabet LB et al. (2007). Combined activation and deactivation of visual cortex during tactile sensory processing, *J Neurophysiol* 97: 1633–1641.
- 42 Хотя некоторые формы сновидений могут возникать в фазе глубокого, не-БДГ-сна (см. Kleitman N (1963). *Sleep and Wakefulness*. Chicago: U Chicago Press), такого рода сны отличаются от более характерных и распространенных БДГ-снов тем, что обычно касаются предстоящих планов или развивают некую мысль, к тому же им не хватает визуальной сочности и яркости, а также свойственных БДГ-сновидениям галлюцинаторных искажений реальности и иллюзорности. Поскольку наша гипотеза основывается на сильной активации зрительной коры, мы имеем в виду именно БДГ-сновидения.
- 43 Эта электрическая активность называется «пonto-геникуло-окципитальные волны» (PGO-волны). Своим названием они обязаны тому, что исходят из области,

именуемой по латыни *pons* (в ит. — *ponto*, мост), следуют в латеральное коленчатое тело (*lateral geniculate nucleus*), отсюда вторая составляющая — «геникуло», а завершают свое путешествие в зрительной коре, называемой также затылочной, или окципитальной (*occipital*). Попутно отмечу, что ведутся споры о том, эквивалентны ли РГО-волны, БДГ-сон и сновидения или это совершенно разные вещи. Для полноты картины добавлю, что у детей и больных шизофренией с префронтальной лоботомией возможен БДГ-сон почти без сновидений. См. Solms M (2000). Dreaming and REM sleep are controlled by different brain mechanisms, *Behav Brain Sci* 23 (6): 843–850 (а также сопровождающие статью темпераментные дебаты коллег); см. также Jus et al. (1973). Studies on dream recall in chronic schizophrenic patients after prefrontal lobotomy, *Biol Psychiatry* 6 (3): 275–293. Неизвестно, носит ли активность в стволовом отделе мозга случайный характер, отражает накопленные за день воспоминания или служит для отработки нейронных программ. Впрочем, тут важно, что, как только волны достигают зрительных областей мозга, их активность переживается нами как зрительные ощущения. См. Nir Y, Tononi G (2010). Dreaming and the brain: from phenomenology to neurophysiology, *Trends Cogn Sci* 14 (2): 88–100.

- 44 Eagleman DM, Vaughn DA (2020). Нашу гипотезу, как и любую биологическую теорию, следует воспринимать в контексте эволюционных временных горизонтов. Программы, командующие построением данного фрагмента нейронной связи, глубоко заложены в генетике и потому независимы от индивидуально переживаемого опыта. Эта связь эволюционно формировалась на протяжении сотен миллионов лет и не подвержена воздействию современных возможностей изгонять тьму электрическим светом.

Многие вопросы наша гипотеза оставляет открытыми: например, почему сновидения делятся не на всем протяжении быстрого сна, а приходят к нам залпами? Кроме того, гипотеза не затрагивает загадку содержания сновидений. Общие представления о содержании снов можно почерпнуть, например, в Flanagan O (2000). *Dreaming souls: sleep, dreams, and the evolution of the conscious mind* (New York: Oxford University Press). Перспективы дальнейших исследований нашей гипотезы связаны с изучением изменений со стороны зрения при заболеваниях, ведущих к потере или нарушениям способности видеть сны. В этом направлении еще очень многое предстоит изучить, учитывая возможность исследовать сновидения через новую призму. Кроме того, БДГ-сон может подавляться ингибиторами моноаминоксидазы или вследствие определенных повреждений мозга; тем не менее сложно выявить нарушения (когнитивные или физиологические) у людей, испытывающих проблемы с этой фазой сна. См. Siegel JM (2001). The REM sleep-memory consolidation hypothesis, *Science* 294: 1058–1063. Однако наша гипотеза предсказывает нарушения зрения, и в сущности, именно они наблюдаются у людей, принимающих ингибиторы моноаминоксидазы или трициклические антидепрессанты. Некоторые врачи считают причиной нечеткости зрения синдром сухого глаза; мы со своей стороны сомневаемся, чтобы корень проблемы крылся именно в этом.

Есть еще один любопытный технический момент: многие гипотезы предполагали, что продолжительность БДГ-сна имеет отношение к предшествующему бодрствованию. Однако будь это так, следовало бы ожидать, что в начале ночного сна продолжительность фазы БДГ-сна должна быть больше, а потом постепенно снижаться. На деле же происходит ровно противоположное: первая фаза БДГ-сна может длиться всего 5–10 минут, тогда как последняя в составе того же ночного сна может иметь продолжительность до 25 минут. См. Siegel JM (2005). *Clues to the functions of mammalian sleep*, Nature 437 (7063): 1264–1271. И это вполне соответствует логике системы, которая вынуждена сражаться за свою территорию тем яростнее, чем дольше она не получает зрительных сигналов от внешнего мира. Еще одно важное замечание: если у молодого животного снизить приток света только в один глаз, аппаратура позволяет зафиксировать, что видящий глаз перехватил часть территории у глаза, к которому не поступает свет. Если затем вы лишите животное БДГ-сна в критически важный для развития чувствительный период, дисбаланс будет развиваться быстрее. Иными словами, БДГ-сон (одинаково благоприятствующий обоим зрительным каналам) помогает замедлить отъем территории зрительной коры, в данном случае — действующим глазом у бездействующего. В отсутствие БДГ-сна территориальные захваты происходят быстрее.

- 45 В статье от 1999 года *The dreams of blind men and women* («Сны незрячих мужчин и женщин») Крэйг Хуровиц с коллегами тщательно описывают и подробно анализируют 372 сновидения пятнадцати незрячих взрослых.
- 46 У людей, лишившихся зрения в возрасте старше семи лет, в сновидениях существует больше зрительного содержания, чем у лишившихся зрения в более раннем возрасте. См. Amadeo M, Gomez E (1966). Eye movements, attention and dreaming in the congenitally blind, Can Psychiat Assoc J.: 501–507; Berger RJ et al. (1962). The EEC, eye-movements and dreams of the blind, Quart J Exp Psychol 14 (3): 183–186; Kerr NH et al. (1982). The structure of laboratory dream reports in blind and sighted subjects, J Nerv Mental Dis 170 (5): 286–294; Hurovitz C et al. (1999). The dreams of blind men and women: a replication and extension of previous findings, Dreaming 9: 183–193; Kirtley DD (1975). The psychology of blindness (Chicago: Nelson-Hall). У поздно ослепших затылочная доля коры в меньшей степени захвачена другими чувствами: см., например, Voss et al. (2006, 2008).
- 47 Zepelin H, Siegel JM, Tobler I (2005). Principles and practice of sleep medicine, vol. 4, ed. MH Kryger, T Roth, and WC Dement (Philadelphia: Elsevier Saunders), 91–100; Jouvet-Mounier D, Astic L, Lacote D (1970). Ontogenesis of the states of sleep in rat, cat, and guinea pig during the first postnatal month, Dev Psychobiol 2: 216–239.
- 48 Siegel JM (2005).
- 49 Angerhausen D et al. (2012). An astrobiological experiment to explore the habitability of tidally locked M-Dwarf planets, Proc Int Astron Union 8 (S293): 192–196. Подчеркну, что примерно такое же положение свойственно Луне, которая все время обращена к Земле одной стороной. Следует отметить, однако, что период осевого обращения Луны в точности совпадает с периодом ее орбитального обращения,

почему мы и видим все время одно и то же ее полушарие, но при этом на Луне все равно имеется разделение суток на день и ночь, поскольку она поворачивается к Солнцу разными сторонами. На планетах с приливно-отливной привязкой к своей звезде день и ночь отсутствуют.

## Глава 4

- 1 Chorost M (2005). *Rebuilt: how becoming part computer made me more human* (Boston: Houghton Mifflin); Chorost M (2011). *World wide mind: the coming integration of humanity, machines, and the internet* (New York: Free Press). Также см. Chorost M (2005). *My bionic quest for bolero*, *Wired*.
- 2 Fleming N (2007). How one man “saw” his son after 13 years, *Telegraph*.
- 3 Ahuja AK et al. (2011). Blind subjects implanted with the argus ii retinal prosthesis are able to improve performance in a spatial-motor task, *Br J Ophthalmol* 95 (4): 539–543.
- 4 Моя аналогия слегка прихрамывает, потому что в мире компьютеров стандарт plug-and-play основан на согласованных правилах подключения: при выпуске периферическое устройство уже содержит некоторую информацию о себе и передает ее компьютеру, чтобы центральный процессор знал, что делать. В отличие от компьютера, мозг применяет несколько иной протокол. Предположительно, его периферические устройства — например, глаз — ничего о себе не знают, а просто делают то, что делают. Зато мозг способен научиться извлекать поступающую от них полезную информацию: проще говоря, указания, как ими пользоваться.
- 5 Фото сделано Sharon Steinmann, AL.com. Родившийся в Алабаме младенец без носа; его мама считает, что он безукоризненно совершенен, ABC News, [www.abcnews.go.com](http://www.abcnews.go.com).
- 6 Lourgos AL (2015). Family of peoria baby born without eyes prepares for treatment in Chicago, *Chicago Tribune*, [www.chicagotribune.com](http://www.chicagotribune.com).
- 7 Данная патология называется LAMM-синдромом (*labyrinthine aplasia, microtia, and microdontia* — аплазия лабиринта, микротия, микродентия). Проявляется в аномалии развития ушей и зубов, а внешне — в виде ушных раковин очень малого размера и очень мелких разреженных зубов. Причина в том, что мутировавший ген ( $FGF_3$ ) запускает каскад клеточных реакций, которые ведут к формированию структур внутреннего и внешнего уха, а также зубов. В результате мутации ген  $FGF_3$  не посылает правильного сигнала активации клеток, что и приводит к LAMM-синдрому.
- 8 Wetzel F (2013). Woman born without tongue has op so she can speak, eat, and breathe more easily, *Sun*, Jan. 18, 2013.
- 9 Такую аномалию называют врожденной нечувствительностью к боли, или врожденной анальгезией. См. Eagleman DM, Downar J (2015). *Brain and behavior* (New York: Oxford University Press).

- 10 Abrams M, Winters D (2003). Can you see with your tongue? Discover.
- 11 Macpherson F, ed. (2018). Sensory substitution and augmentation (Oxford: Oxford University Press); Lenay C et al. (2003). Sensory substitution: limits and perspectives, in touching for knowing: Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception, ed. Y Hatwell, A Streri, and E Gentaz (Philadelphia: John Benjamins), 275–292; Poirier C, De Volder AG, Scheiber C (2007). What neuroimaging tells us about sensory substitution, Neurosci Biobehav Rev 31: 1064–1070; Bubic A, Striem-Amit E, Amedi A (2010). Large-scale brain plasticity following blindness and the use of sensory substitution devices, in Multisensory Object Perception in the Primate Brain, ed. MJ Naumer and J Kaiser (New York: Springer), 351–380; Novich SD, Eagleman DM (2015). Using space and time to encode vibrotactile information: toward an estimate of the skin's achievable throughput, Exp Brain Res 233 (10): 2777–2788; Chebat DR et al. (2018). Sensory substitution and the neural correlates of navigation in blindness, in Mobility of Visually Impaired People (Cham: Springer), 167–200.
- 12 Bach-y-Rita P (1972). Brain mechanisms in sensory substitution (New York: Academic Press); Brain mechanisms in sensory substitution; Bach-y-Rita P (2004). Tactile sensory substitution studies, Ann NY Acad Sci 1013: 83–91.
- 13 Hurley S, Noë A (2003). Neural plasticity and consciousness, Biology and Philosophy 18 (1): 131–168; Noë A (2004). Action in Perception (Cambridge, Mass: MIT Press).
- 14 Bach-y-Rita P et al. (2003). Seeing with the brain, Int J Human-Computer Interaction, 15 (2): 285–295; Nagel SK et al. (2005). Beyond sensory substitution — learning the sixth sense, J Neural Eng 2 (4): R13–R26.
- 15 Starkiewicz W, Kuliszewski T (1963). The 80-channel elektroftalm, in Proceedings of the International Congress on Technology and Blindness (New York: American Foundation for the Blind).
- 16 Гипотезу о том, что кора головного мозга везде фундаментально одинакова, но приобретает форму под действием входящих потоков информации, первоначально изучал нейрофизиолог Вернон Маунткасл; позже учений и изобретатель Джекф Хокинс реанимировал гипотезу Маунткасла и подарил ей новую жизнь. См. Hawkins J, Blakeslee S (2005). On Intelligence (New York: Times Books).
- 17 Pascual-Leone A, Hamilton R (2001). The metamodal organization of the brain, in Vision: From Neurons to Cognition, ed. C Casanova and M Ptito (New York: Elsevier Science), 427–445.
- 18 Sur M (2001). Cortical Development: Transplantation and rewiring studies, in International Encyclopedia of the Social and Behavioral Sciences, ed. N Smelser and P Baltes (New York: Elsevier).
- 19 Sharma J, Angelucci A, Sur M (2000). Induction of visual orientation modules in auditory cortex, Nature 404: 841–847. Клетки в этой обновленной слуховой коре теперь реагируют, скажем, на различную пространственную ориентацию линий.
- 20 Хочу предупредить об одной тонкости (подробнее рассмотрим ее в следующих главах): мозг приходит в мир не как абсолютно чистый лист. И по этой причине у хорька реагирующая на визуальные данные слуховая кора несколько

неряшливее в кодировании по сравнению с нормальной зрительной корой. Генетические настройки местного значения придают одним участкам коры чуть большую предрасположенность к определенному типу входящей сенсорной информации. Между жестко заданными планами построения (генетикой) и гибкостью в зависимости от вида активности (живая, динамически перемеччивая нейронная связь), как между краями спектра, располагается непрерывный диапазон постепенно меняющихся значений. Почему так? Потому что в масштабах эволюционного времени устойчивые входные данные медленно переходят из разряда заученного на протяжении жизни в разряд генетически запрограммированного. А наша цель — сосредоточить внимание на колossalной гибкости мозга, наблюдаемой в пределах продолжительности человеческой жизни.

- 21 Bach-y-Rita P et al. (2005). Late human brain plasticity: vestibular substitution with a tongue brainport human-machine interface, *Intellectica* 1 (40): 115–122; Nau AC et al. (2015). Acquisition of visual perception in blind adults using the brainport artificial vision device, *Am J Occup Ther* 69 (1): 1–8; Stronks HC et al. (2016). Visual task performance in the blind with the brainport V100 vision aid, *Expert Rev Med Devices* 13 (10): 919–931.
- 22 Sampaio E, Maris S, Bach-y-Rita P (2001). Brain plasticity: “visual” acuity of blind persons via the tongue, *Brain Res* 908 (2): 204–207.
- 23 Levy B (2008). The blind climber who “sees” with his tongue, *Discover*, June 22, 2008.
- 24 Bach-y-Rita P et al. (1969). Vision substitution by tactile image projection, *Nature* 221: 963–964; Bach-y-Rita P (2004). Tactile Sensory Substitution Studies, *Ann NY Acad Sci* 1013: 83–91.
- 25 Эту область обозначают как MT+. См. Matteau I et al. (2010). Beyond visual, aural, and haptic movement perception: hMT+ is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals, *Brain Res Bull* 82 (5–6): 264–270. См. также Amedi A et al. (2010). Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans, *Restor Neurol Neurosci* 28 (2): 143–156; Merabet L et al. (2009). Functional recruitment of visual cortex for sound encoded object identification in the blind, *Neuroreport* 20 (2): 132. У незрячих также активируются многие другие участки затылочной доли коры, именно этого нам и следует ожидать вследствие кортикальных захватов, которые мы рассматривали в главе 3.
- 26 WIRED Science video: “Mixed Feelings”.
- 27 Forehead Retina System — разработка японской корпорации EyePlusPlus Inc. и Tachi Laboratory Токийского университета. Для имитации сетчатки в приборе применяется выделение контуров (для повышения контрастности) и временная фильтрация полосы частот.
- 28 Это хороший способ не позволять талии попусту бездельничать. См. Lobo L et al. (2018). Sensory substitution: using a vibrotactile device to orient and walk to targets, *J Exp Psychol Appl* 24 (1): 108. См. также Lobo L et al. (2017). Sensory substitution and walking toward targets: an experiment with blind participants. Исследования

авторов показывают, что траектории движения незрячих не планируются заранее, а прокладываются прямо во время движения по мере поступления новой информации об окружающей обстановке.

- 29 Kay L (2000). Auditory perception of objects by blind persons, using a bioacoustic high resolution air sonar, *J Acoust Soc Am* 107 (6): 3266–3276. Акустические очки впервые были представлены публике в середине 1970-х годов и после дебюта прошли многие этапы дальнейшего усовершенствования. См. Binaural Sensory Aid Кея (стереофоническое сенсорное устройство для слепых) и представленную им позже более совершенную систему KASPA — Kay's Advanced Spatial Perception Aid, которая отображает текстуру поверхностей через различия в тембре звука. Разрешение у подобных ультразвуковых устройств невысокое, особенно в вертикальной плоскости, и потому акустические очки наиболее полезны для обнаружения объектов, расположенных в узкой горизонтальной полосе пространства.
- 30 Bower TGR (1978). Perceptual development: object and space, in *Handbook of Perception*, vol. 8, *Perceptual Coding*, ed. EC Carterette and MP Friedman (New York: Academic Press). См. также Aitken S, Bower TGR (1982). Intersensory substitution in the blind, *J Exp Child Psychol* 33: 309–323.
- 31 Дело в том, что ввиду снижающейся с возрастом пластичности мозга сенсорное замещение требуется разрабатывать индивидуально — как под текущий возраст, так и с учетом возраста приобретения слепоты. См. Bubic, Striem-Amit, Amedi (2010).
- 32 Meijer PB (1992). An experimental system for auditory image representations, *IEEE Trans Biomed Eng* 39 (2): 112–121.
- 33 Технические подробности см. на [www.seeingwithsound.com](http://www.seeingwithsound.com), и там же можно послушать, как звучит работающий vOICe-алгоритм.
- 34 Arno P et al. (1999). Auditory coding of visual patterns for the blind, *Perception* 28 (8): 1013–1029; Arno P et al. (2001). Occipital activation by pattern recognition in the early blind using auditory substitution for vision, *Neuroimage* 13 (4): 632–645; Auvray M, Hanneton S, O'Regan JK (2007). Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: localisation and object recognition with “the vOICe”, *Perception* 36: 416–430; Proulx MJ et al. (2008). Seeing “where” through the ears: effects of learning-by-doing and long-term sensory deprivation on localization based on image-to-sound substitution, *PLoS One* 3 (3): e1840.
- 35 Cronly-Dillon J, Persaud K, Gregory RP (1999). The perception of visual images encoded in musical form: a study in cross-modality information transfer, *Proc Biol Sci* 266 (1436): 2427–2433; Cronly-Dillon J, Persaud KC, Blore R (2000). Blind subjects construct conscious mental images of visual scenes encoded in musical form, *Proc Biol Sci* 267 (1458): 2231–2238.
- 36 Отзыв Пэт Флетчер из статьи в журнале американского общества слепых ACB Braille Forum — цит. по Maidenbaum S et al. (2014). Sensory substitution: closing the gap between basic research and widespread practical visual rehabilitation, *Neurosci Biobehav Rev* 41: 3–15.

- 37 У Amedi et al (2007) конкретно продемонстрирована активность в латеральной затылочной тактильной визуальной области (LOtv). Как представляется, эта область кодирует информацию о форме — активируется ли она зрением, осознанием, заучиванием или, как зрительный ландшафт, транслируется в звуковой. См. Amedi et al (2007). Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex, *Nat Neurosci* 10: 687–689. Краткое обобщение опыта одного из пользователей см. в Piore A (2017). *The Body Builders: Inside the Science of the Engineered Human* (New York: Ecco).
- 38 Collignon O et al. (2007). Functional cerebral reorganization for auditory spatial processing and auditory substitution of vision in early blind subjects, *Cereb Cortex* 17 (2): 457–465.
- 39 Abboud S et al. (2014). EyeMusic: Introducing a “visual” colorful experience for the blind using auditory sensory substitution, *Restor Neurol Neurosci* 32 (2): 247–257. Технология EyeMusic опирается на более раннюю технологию SmartSight: Cronly-Dillon et al. (1999, 2000).
- 40 Massiceti D, Hicks SL, van Rheede JJ (2018). Stereosonic vision: Exploring visual-to-auditory sensory substitution mappings in an immersive virtual reality navigation paradigm, *PLoS One* 13 (7): e0199389; Tapu R, Mocanu B, Zaharia T (2018). Wearable assistive devices for visually impaired: A state of the art survey, *Pattern Recognit Lett*; Kubanek M, Bobulski J (2018). Device for acoustic support of orientation in the surroundings for blind people, *Sensors* 18 (12): 4309. См. также Hoffmann R et al. (2018). Evaluation of an audio-haptic sensory substitution device for enhancing spatial awareness for the visually impaired, *Optom Vis Sci* 95 (9): 757.
- 41 В развивающемся мире самая распространенная причина слепоты — трахома (инфекционная болезнь, которую вызывают хламидии), по вине которой зрения лишились почти 2 млн человек. Второй по распространенности причиной выступает эндемическое для тридцати африканских стран заболевание онхочеркоз. Многие ученые считают, что сенсорно-заместительное программное обеспечение поможет заново научить видеть тех, кто лишился зрения, в сочетании с другими видами терапии (например, хирургией роговицы).
- 42 Koffler T et al. (2015). Genetics of hearing loss, *Otolaryngol Clin North Am* 48 (6): 1041–1061.
- 43 Novich SD, Eagleman DM (2015). Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin’s achievable throughput, *Exp Brain Res* 233 (10): 2777–2788. См. также Neosensory.com. Можно ли было выбрать что-либо другое помимо вибрации? На самом деле кожа наделена рецепторами нескольких типов, и их тоже можно использовать для передачи информации — помимо вибраций через температуру, почесывание, болевые ощущения и растяжения. Но мы решили сосредоточиться на вибрациях, так как этот способ самый быстрый. Температура воспринимается медленнее, к тому же не имеет выраженной локализации. Тензорецепторы многообещающие в плане пространственных и временных свойств, но в долгосрочной перспективе постоянные растягивания кожи создавали бы пользователям дискомфорт. От необходимости

рассуждать о болевых рецепторах меня, надо думать, избавляют общегуманные соображения.

- 44 Позволю себе небольшое отступление: как вы могли заметить, индивиду с врожденной глухотой свойствен свой «акцент». Думаете, это нечто вроде дефекта речи? Вовсе нет. Дело в том, что абсолютно глухой от рождения человек учится произносить слова, наблюдая и копируя артикуляцию говорящих людей. В принципе, для глухих вполне действенный способ учиться говорить — подражание движениям губ говорящего. Правда, в этом способе есть один изъян: глухой человек не может видеть, как у того двигается язык, и, значит, не может скопировать его движения. Попробуйте произнести обычную фразу, не двигая языком, и ваши слова будут звучать так же, как их произнес бы глухой индивид. Наше устройство любопытно тем, что дает возможность преодолеть этот скрытый недостаток. Оно позволяет пользователю уловить разницу в том, как звучит слово, когда его произносит другой человек, с его звучанием в собственном исполнении и тем самым обрести возможность пробовать разные варианты произношения, пока не добьется правильного звучания.
- 45 Alcorn S (1932). The Tadoma method, Volta Rev 34: 195–198; Reed CM et al. (1985). Research on the Tadoma method of speech communication, J Acoust Soc Am 77: 247–257.
- 46 Ограниченные вычислительные возможности вынуждали разрабатывать технологию замещения звуковых ощущений тактильными с использованием полосового фильтра звуковых частот, причем отфильтрованный звук «проигрывался» на коже посредством вибраций соленоидов. Они работали на фиксированной частоте, составлявшей менее половины пропускной полосы некоторых каналов, из-за чего возникали помехи. Современные возможности позволяют производить вычисления намного быстрее и дешевле. Желаемые математические преобразования осуществимы в режиме реального времени фактически без затрат и без необходимости заказывать специальные интегральные микросхемы (ИМС). Литийионные батареи позволяют поддерживать большее число датчиков вибрации, чем в ранних разработках устройств. О разработках слуховых устройств (аппаратов) на основе замещения звука осзыванием см. Summers and Gratton (1995); Traunmuller (1980); Weisenberger et al. (1991); Reed and Delhorne (2003); Galvin et al. (2001). См. также Cholewiak RW, Sherrick CE (1986). Tracking skill of a deaf person with long-term tactile aid experience: A case study, J Rehabil Res Dev 23 (2): 20–26.
- 47 Turchetti et al. (2011). Systematic review of the scientific literature on the economic evaluation of cochlear implants in paediatric patients, Acta Otorhinolaryngol 31 (5): 311.
- 48 Индивидам с уже вживленным кохлеарным имплантатом ношение вибротактильного устройства помогает в среднем на 20% улучшить способность распознавать средовые шумы: например, собачий лай, стук в дверь, сигналы автомобилей (данные внутренних исследований в рамках проекта Neosensory).
- 49 Danilov YP et al. (2007). Efficacy of electrotactile vestibular substitution in patients with peripheral and central vestibular loss, J Vestib Res 17 (2–3): 119–130.

- 50 По поводу сенсорного замещения замечу: выбор наилучшего варианта для индивида — ретинальный чип или сенсорное замещение — зависит от первопричины слепоты. Ретинальный чип станет идеальным решением для страдающих различными формами дегенерации фоторецепторов (например, такие как пигментная дистрофия сетчатки или возрастная макулярная дегенерация (дегенерация желтого тела)), поскольку эти патологии не затрагивают нижележащие элементы зрительной системы и те сохраняют способность принимать сигналы от имплантированных электродов. Другие формы слепоты не позволяют применять ретинальный чип: если проблема (скажем, отслоение сетчатки) корениится в другой части глаза или возникла в результате повреждения в нижележащих элементах зрительной системы (например, опухоль или повреждение ткани в результате инсульта), от ретинального чипа толку не будет. В подобных случаях правильным решением станет сенсорное замещение или подключение вспомогательного устройства напрямую в мозг, ниже поврежденного участка. Обратите также внимание, что ряд ученых исследуют перспективы комбинации устройств сенсорного замещения с имплантацией подключаемых модулей (в мозг или сетчатку глаза); идея в том, что сенсорное замещение помогает зрительной коре интерпретировать данные, поступающие от протеза, — иными словами, служит руководством по дешифровке информации.
- 51 Узнать об опыте Нейла из первых рук можно, послушав его выступление на TED-конференции. Инновации последних лет включают расширение возможностей глазборга по кодированию насыщенности цветов за счет перепадов громкости звука. Само устройство преобразовали в чип, который теоретически можно имплантировать. Чтобы получить представление о достижениях других исследовательских групп, см., например, об устройстве Colorophone здесь: Osinski D, Hjelme DR (2018). A sensory substitution device inspired by the human visual system, in 2018 11th International Conference on Human System Interaction. (HSI: 186-192), IEEE.
- 52 Вдохновленные успехом глазборга, а также других проектов, Нейл Харбиссон с коллегой основали некоммерческий фонд Cyborg Foundation, задача которого — сочетать новейшие технологии с человеческими телом.
- 53 В частности, они встраиваются в человеческий фотопигмент. Jacobs GH et al. (2007). Emergence of novel color vision in mice engineered to express a human cone photopigment, *Science* 315 (5819): 1723–1725.
- 54 Mancuso K et al. (2009). Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates, *Nature* 461: 784–788. Исследователи вводили за сетчатку обезьян вирус, содержащий ген чувствительного к красному цвету белка опсина. После 20-недельной практики животные научились пользоваться цветным зрением и различать с его помощью прежде неразличимые ими цвета. Одну обезьяну назвали Дальтоном — по имени британского химика Джона Дальтона, в 1794 году первым описавшего случай цветовой слепоты.
- 55 Jameson KA (2009). Tetrachromatic color vision, in *The Oxford Companion to Consciousness*, ed. P Wilken, T Bayne, and A Cleeremans (Oxford: Oxford University Press).

- 56 Аккомодирующая линза Crystalens (пр-ва компании Bauch + Lomb). См. Cornell PJ (2011). Blue-violet subjective color changes after Crystalens implantation, Cataract and Refractive Surgery Today. Подробнее о том, как ощущается некоторое расширение зрительного восприятия за счет ультрафиолетового диапазона, см. пост в блоге Алекса Комарницкого по ссылке: [www.komar.org/faq/colorado-cataract-surgery-crystalens/ultra-violet-color-glow](http://www.komar.org/faq/colorado-cataract-surgery-crystalens/ultra-violet-color-glow). Кстати, обратите внимание, что излучение большинства коммерческих светильников «черного света» (вроде лампы Вуда) на самом деле почти исключительно сосредоточено в наиболее длинноволновой части ультрафиолетового диапазона. Скорее всего, именно поэтому — если вам не имплантированы искусственные линзы — вы воспринимаете этот свет как слабо отливающий фиолетовым.
- 57 Ardouin J et al. (2012). FlyVIZ: A novel display device to provide humans with 360° vision by coupling catadioptric camera with HMD, in Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology: 41–44; Guillermo AB et al. (2016). Enjoy 360° vision with the FlyVIZ, in ACM SIGGRAPH 2016 Emerging Technologies (New York: ACM), 6.
- 58 Wolbring G (2013). Hearing beyond the normal enabled by therapeutic devices: The role of the recipient and the hearing profession, Neuroethics 6: 607.
- 59 Eagleman DM. Can we create new senses for humans? TED talk, March 2015, ted.com. См. также Hawkins, Blakeslee (2004).
- 60 О Хаффмане: в беседе с автором; о Ларратте: интервью из Dvorsky G (2021). What does the future have in store for radical body modification? Обратите внимание, что Ларратту все же пришлось удалить магниты, поскольку с них сошло покрытие.
- 61 Nordmann GC, Hochstoeger T, Keays DA (2017). Magnetoreception — a sense without a receptor, PLoS Biol 15 (10): e2003234.
- 62 Kaspar K et al. (2014). The experience of new sensorimotor contingencies by sensory augmentation, Conscious Cogn 28: 47–63; Kärcher SM et al. (2012). Sensory augmentation for the blind, Front Hum Neurosci 6: 37.
- 63 Nagel SK et al. (2005). Beyond sensory substitution — learning the sixth sense, J Neural Eng 2 (4): R13.
- 64 Там же.
- 65 Там же. Обратите внимание, как любопытно это свойство связано с тем, что мы выше наблюдали у незрячих людей: они эффективнее, чем зрячие, используют ушную раковину (внешнюю структуру уха) для локализации людей и объектов.
- Иными словами, зрячие люди располагают такой же способностью, однако в их случае сигнал слишком слаб, чтобы достичь поверхности сознания. При необходимости, однако, вполне можно натренироваться воспринимать эти еле различимые сигналы и получать от них пользу.
- Прошу также обратить внимание, что в 2018 году ученые разработали тонкую электронную кожу, точнее, маленький наручный стикер, указывающий направление на магнитный север. См. Cañón Bermúdez GS et al. (2018). Electronic-skin

- compasses for geomagnetic field-driven artificial magnetoreception and interactive electronics, *Nat Electron* 1: 589–595.
- 66 Norimoto H, Ikegaya Y (2015). Visual cortical prosthesis with a geomagnetic compass restores spatial navigation in blind rats, *Curr Biol* 25 (8): 1091–1095.
- 67 Полет без видимого горизонта представлял большую опасность, и решить проблему удалось только с изобретением бортового гироскопического прибора — авиаориентира. У одного из бомбардировщиков времен Второй мировой войны место второго пилота было установлено неровно, и из-за обманчивых ощущений летчики могли сбиться с курса. Для противодействия «эффекту ягодиц» были даже разработаны специальные тренировочные программы.
- 68 К слову сказать, Декарт пришел к заключению, что ему никогда не дано будет знать, является ли окружающая реальность иллюзией или нет. Но вопреки собственному выводу Декарт делает важнейшее для философии открытие: он осознаёт, что некто ставит вопрос, и даже если этот некто находится во власти дьявольских козней, он все равно существует. *Cogito ergo sum*: «я мыслю, следовательно, я существую». Возможно, вам так никогда и не удастся узнать, жертва ли вы дьявола или мозги в сосуде, но во всяком случае некое «вы» существует, чтобы задаваться этим вопросом. Об аргументе относительно мозгов в сосуде см. Putnam H (1981). *Reason, Truth, and History* (New York: Cambridge University Press).
- 69 Neely RM et al. (2018). Recent advances in neural dust: Towards a neural interface platform, *Curr Opin Neurobiol* 50: 64–71.
- 70 Данный тип вопросов не следует путать с синестезией, когда раздражение одного органа чувств наряду со специфическими для него ощущениями вызывает также ощущения, соответствующие другому органу чувств: например, когда звук параллельно вызывает определенное цветовое ощущение. При синестезии индивид отдает себе отчет, что послужило первоначальным стимулом (раздражителем), и при этом ощущает еще какое-то качество, в нормальном случае не свойственное восприятию данным органом чувств. В основном тексте я имею в виду именно случай, когда индивид *путает* одно ощущение с другим. О синестезии подробнее см. Cytowic RE, Eagleman DM (2009). *Wednesday Is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia* (Cambridge, Mass.: MIT Press).
- 71 Eagleman DM (2018). We will leverage technology to create new senses, *Wired*.
- 72 O'Regan JK, Noë A (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness, *Behav Brain Sci* 24 (5): 939–973. Помните эксперименты Бах-и-Риты с незрячими в стоматологическом кресле? Он отмечал значительные улучшения, когда участники эксперимента могли установить соответствие между своими действиями и получаемой обратной связью: если они поворачивали камеру в разные стороны, мир вокруг них менялся предсказуемым образом. Чувственное восприятие, будь оно естественно-биологическое или искусственное, дает возможность активно исследовать окружающую реальность и связывать определенное действие со специфическим ответным изменением входных потоков данных. См. Bach-y-Rita (1972, 2004); Hurley, Noë (2003); Noë (2004).
- 73 Nagel et al. (2005).

## Глава 5

- 1 Fuhr P et al. (1992). Physiological analysis of motor reorganization following lower limb amputation, *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 85 (1): 53–60; Pascual-Leone A et al. (1996). Reorganization of human cortical motor output maps following traumatic forearm amputation, *Neuroreport* 7: 2068–2070; Hallett M (1999). Plasticity in the human motor system, *Neuroscientist* 5: 324–332; Karl A et al. (2001). Reorganization of motor and somatosensory cortex in upper extremity amputees with phantom limb pain, *J Neurosci* 21: 3609–3618.
- 2 Vargas CD et al. (2009). Re-emergence of hand-muscle representations in human motor cortex after hand allograft, *Proc Natl Acad Sci USA* 106 (17): 7197–7202.
- 3 Гены гомеобокса регулируют развитие крупных телесных структур. Например, одно из первых открытий действия гомеобокса связано с выявлением у мухек дрозофил мутации, когда пара лапок может образоваться на голове, где должны помещаться антенны, а при обратной мутации антенны, наоборот, вырастают на месте лапок. Причина этого явления в том, что некоторые гены работают как включатель, запускающий каскад других генов, — вот почему многие мутации в генах влекут за собой странную форму или отсутствие части тела; поэтому, например, ребенок может родиться с хвостом. См. Mukhopadhyay B et al. (2012). Spectrum of human tails: A report of six cases, *J Indian Assoc Pediatr Surg* 17 (1): 23–25.
- 4 Sommerville Q (2006). Three-armed boy “recovering well”, BBC News, July 6, 2006.
- 5 Bongard J, Zykov V, Lipson H (2006). Resilient machines through continuous self-modeling, *Science* 314: 1118–1121; Pfeifer R, Lungarella M, Iida F (2007). Self-organization, embodiment, and biologically inspired robotics, *Science* 318 (5853): 1088–1093.
- 6 Кстати, принцип, когда робот снабжен моделью самого себя, открывает простор для конструирования себе подобных. Методом проб и ошибок он будет оценивать, далеко ли порожденному им роботу до него самого, и пытаться добиться полной идентичности.
- 7 Nicolelis M (2011). Beyond Boundaries: The New Neuroscience of Connecting Brains with Machines — and How It Will Change Our Lives (New York: St. Martin’s Griffin).
- 8 Kennedy PR, Bakay RA (1998). Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection, *Neuroreport* 9: 1707–1711.
- 9 Hochberg LR et al. (2006). Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia, *Nature* 442: 164–171.
- 10 Спиноцеребеллярная атаксия — редкое нейродегенеративное заболевание, которое разрушает коммуникацию между мозгом и мышцами. Анализ медицинского случая Джен см. Collinger JL et al. (2013). High-performance neuroprosthetic control by an individual with tetraplegia, *Lancet* 381 (9866): 557–564. Обзор методов лечения и их перспектив см. Eagleman DM (2016). The Brain

- (Edinburgh: Canongate Books), and Khatchadourian R (2018), *Degrees of freedom*, New Yorker.
- 11 Upton S (2014). What is it like to control a robotic arm with a brain implant? *Scientific American*.
  - 12 Самые успешные методики предполагают имплантацию электродов в мозг нейрохирургическим путем, в разработке также находятся менее инвазивные методы (например, размещение электродов снаружи головы).
  - 13 Предполагается вживить по пять имплантатов в каждое полушарие мозга: в дорсальную и вентральную части премоторной коры, первичную моторную кору, первичную соматосенсорную кору и заднюю теменную кору. Обновления о ходе проекта см. на [www.WalkAgainProject.org](http://www.WalkAgainProject.org).
  - 14 Bouton CE et al. (2016). Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia, *Nature* 533 (7602): 247. В исследовании участвовал доброволец с травмой шейного отдела спинного мозга. Исследователи использовали алгоритм машинного обучения для наиболее точной интерпретации взрыва нейронной активности, а суммарные сигналы затем направлялись высокотехнологичной системе электрической стимуляции мышц.
  - 15 Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y (1996). Attention-induced neuronal activity in the monkey somatosensory cortex revealed by pupillometrics, *Neurosci Res* 25 (2): 173–181; Maravita A, Iriki A (2004). Tools for the body (schema), *Trends Cogn Sci* 8: 79–86.
  - 16 Velliste M et al. (2008). Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding, *Nature* 453: 1098–1101. Кстати, зря мы привыкли представлять роборуку в виде металлической конструкции. Роботы в металлическом веке надолго не задержатся. «Пластичных», или мягкотелых, роботов делают из эластичных каучуков и гибких пластиков. В современных исследованиях для создания искусственных пальцев, щупалец, трубок и прочих органов применяются материалы, максимально приближенные к живым тканям. Изделия изменяют форму за счет коррекции давления воздуха или использования электрических или химических сигналов.
  - 17 Fitzsimmons N et al. (2009). Extracting kinematic parameters for monkey bipedal walking from cortical neuronal ensemble activity, *Front Integr Neurosci* 3: 3; Nicolelis M (2011). Limbs that move by thought control, *New Scientist* 210 (2813): 26–27. См. также Nicolelis's 2012 TEDMED talk: “A monkey that controls a robot with its thoughts. No, really”.
  - 18 Nicolelis M. Beyond Boundaries: the new neuroscience of connecting brains with machines — and how it will change our lives.
  - 19 Во всяком случае, Мать-природа никогда напрямую не занималась этой задачей. Можно утверждать, что проблему с Bluetooth она решила, предоставив человеку возможность эволюционировать из «первичного бульона», с тем чтобы люди сами расстарались для нее с этим самым Bluetooth.
  - 20 Ощущение, что часть тела чужеродна или представляет собой нечто дикое и странное, обычно классифицируется как соматоагнозия, тогда как отрицание

- пациентом факта, что конечность принадлежит ему, относится к подмножеству расстройств, называемых соматопарафреней. См. Feinberg T et al. (2010). The neuroanatomy of asomatognosia and somatoparaphrenia, J Neurol Neurosurg Psychiatry 81: 276–281. См. также Dieguez S, Annoni J-M (2013). Asomatognosia, in The Behavioral and Cognitive Neurology of Stroke, ed. O Goderfroy and J Bogousslavsky (Cambridge, U.K.: Cambridge University Press), 170. См. также Feinberg TE (2001). Altered Egos: How the Brain Creates the Self (New York: Oxford University Press) и Arzy S et al. (2006). Neural mechanisms of embodiment: Asomatognosia due to premotor cortex damage, Arch Neurol 63: 1022–1025. Обратите внимание, что авторы еще не приняли окончательного решения, считать ли все формы соматоагнозии разновидностями одного и того же расстройства или это, наоборот, фундаментально различные расстройства, объединенные зонтичным названием.
- 21 Pearce J (2007). Misoplegia, Eur Neurol 57: 62–64.
- 22 Sacks OW (1984). A Leg to Stand On (New York: Harper & Row); Sacks OW (1982). The leg, London Review of Books, June 17, 1982. См. также Stone J, Perthen J, Carson AJ (2012). “A Leg to Stand On” by Oliver Sacks: A unique autobiographical account of functional paralysis, J Neurol Neurosurg Psychiatry 83 (9): 864–867.
- 23 Simon M (2019). How I became a robot in London — from 5,000 miles away, Wired.
- 24 Herrera F et al. (2018). Building long-term empathy: A large-scale comparison of traditional and virtual reality perspective-taking, PloS One 13 (10): e0204494; van Loon A et al. (2018). Virtual reality perspective-taking increases cognitive empathy for specific others, PloS One 13(8): e0202442. См. также Bailenson J (2018). Experience on Demand (New York: W. W. Norton).
- 25 Won AS, Bailenson JN, Lanier J (2015). Homuncular flexibility: The human ability to inhabit nonhuman avatars, in Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences, ed. R Scott and M Buchmann (John Wiley & Sons), 1–6.
- 26 Won, Bailenson, Lanier (2015). См. также Laha B et al. (2016). Evaluating control schemes for the third arm of an avatar, Presence: Teleoperators and Virtual Environments 25 (2): 129–147.
- 27 Steptoe W, Steed A, Slater M (2013). Human tails: Ownership and control of extended humanoid avatars, IEEE Trans Vis Comput Graph 19: 583–590.
- 28 Hershfield HE et al. (2011). Increasing saving behavior through age-progressed renderings of the future self, JMR 48(SPL): S23–37; Yee And et al. (2011). The expression of personality in virtual worlds, Soc Psycho Pers Sci 2 (1): 5–12; Fox J et al (2009). Virtual experiences, physical behaviors: The effect of presence on imitation of an eating avatar, Presence 18 (4): 294–303.
- 29 DeCandido K (1997). “Arms and the man”, in Untold Tales of Spider-Man, ed. S Lee and K Busiek (New York: Boulevard Books).
- 30 Wetzel F (2012). Dad who lost arm gets new lease of life with most hi-tech bionic hand ever, Sun.
- 31 Eagleman DM (2011) в 20 predictions for the next 25 years, Observer, Jan. 2, 2011.

## Глава 6

- 1 Возможно, свою роль сыграла генетическая предрасположенность, но утверждать что-либо определенное трудно. С другой стороны, не существует генов, которые бы напрямую кодировали шахматную одаренность, так что годы и годы тренировок, несомненно, сыграли свою роль.
- 2 Schweighofer N, Arbib MA (1998). A model of cerebellar metaplasticity, *Learn Mem* 4 (5): 421–428.
- 3 Позволю себе упомянуть о маленьком курьезе: когда я впервые услышал эту историю, речь в ней шла именно о Перлмане, однако позже мне попадалась в интернете та же история, но в ней фигурировали то Фриц Крейслер, то Исаак Стерн, то еще кто-нибудь из выдающихся музыкантов. Впрочем, кто бы на самом деле ни произнес эту знаменательную фразу, любой музыкант будет не прочь, если эту историю припишут именно ему.
- 4 Elbert T et al. (1995). Increased finger representation of the fingers of the left hand in string players, *Science* 270: 305–306; Bangert M, Schlaug G (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology, *Eur J Neurosci* 24: 1832–1834. Если посмотреть на соответствующую извилину (выступающую складку на поверхности коры) у немузыканта, видно, что она прямая, тогда как у музыканта та же извилина делает необычный изгиб. Обратите внимание, что левая рука скрипача, которая выполняет всю тонкую работу, представлена омегой в правом полушарии, поскольку именно в нем располагается представительство левой руки.
- 5 Впервые этот феномен был продемонстрирован на беличьих обезьянах, которых натренировали выполнять одну из двух различающихся задач: доставать мелкий предмет из резервуара или поворачивать массивный ключ. Первая задача требовала ловкости пальцев, вторая — силы в запястье и предплечье. Когда обезьян обучили выполнять первую задачу, кортикальное представительство пальцев постепенно увеличило свою территорию, а представительства запястья и предплечья ужалились. И наоборот, когда обезьян обучали поворачивать ключ, у них расширялись кортикальные территории запястья и предплечья. См. Nudo RJ et al. (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys, *J Neurosci* 16 (2): 785–807.
- 6 Karni A et al. (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning, *Nature* 377: 155–158.
- 7 Draganski B et al. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training, *Nature* 427 (6972): 311–312; Driemeyer J et al. (2008). Changes in gray matter induced by learning — revisited, *PLoS One* 3 (7): e2669; Boyke J et al. (2008). Training-induced brain structure changes in the elderly, *J Neurosci* 28 (28): 7031–7035; Scholz J et al. (2009). Training induces changes in white-matter architecture, *Nat Neurosci* 12 (11): 1370–1371. Как предполагает гипотеза, уплотнение серого вещества, наблюдаемое через неделю тренировок, вероятно, обусловлено увеличением размера синапсов или клеточных тел, тогда как увеличение объема

- серого вещества в более длительном периоде (месяцы) может отражать рождение новых нейронов, особенно в гиппокампе.
- 8 Eagleman DM (2011). *Incognito: The Secret Lives of the Brain* (New York: Pantheon). Издание на русском языке: Иглмен Д. Инкогнито. Тайная жизнь мозга. М. : Манин, Иванов и Фербер, 2019.
  - 9 Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y (1996). Attention-induced neuronal activity in the monkey somatosensory cortex revealed by pupillometrics, *Neurosci Res* 25 (2): 173–181; Maravita A, Iriki A (2004). Tools for the body (schema), *Trends Cogn Sci* 8: 79–86.
  - 10 Draganski B et al. (2006). Temporal and spatial dynamics of brain structure changes during extensive learning, *J Neurosci* 26 (23): 6314–6317.
  - 11 Ilg R et al. (2008). Gray matter increase induced by practice correlates with task-specific activation: A combined functional and morphometric magnetic resonance imaging study, *J Neurosci* 28 (16): 4210–4215.
  - 12 Maguire EA et al. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers, *Proc Natl Acad Sci USA* 97 (8): 4398–4403. См. также Maguire EA, Frackowiak RS, Frith CD (1997). Recalling routes around London: Activation of the right hippocampus in taxi drivers, *J Neurosci* 17 (18): 7103–7110.
  - 13 Kuhl PK (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code, *Nat Rev Neurosci* 5: 831–843.
  - 14 Первоначально данные исследования проводились на обезьянах. В одном исследовании подопытную обезьяну подвергали воздействию одновременно и аудиального, и тактильного раздражителя. Если задача требовала внимания к тактильным ощущениям, в соматосенсорной коре животного наблюдались пластические изменения, каких не демонстрировала его слуховая кора. Если обезьяну ориентировали обращать внимание на слуховую стимуляцию, происходило обратное: пластические изменения в слуховой коре, а в соматосенсорной — никаких. См. Recanzone GH et al. (1993). Plasticity in the frequency representation of primary auditory cortex following discrimination training in adult owl monkeys, *J Neurosci* 13 (1): 87–103; Jenkins WM et al. (1990). Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation, *J Neurophysiol* 63 (1): 82–104; Bavelier D, Neville HJ (2002). Cross-modal plasticity: Where and how? *Nat Rev Neurosci* 3 (6): 443.
  - 15 Taub E, Uswatte G, Pidikiti R (1999). Constraint-induced movement therapy: A new family of techniques with broad application to physical rehabilitation, *J Rehabil Res Dev* 36 (3): 1–21; Page SJ, Boe S, Levine P (2013). What are the “ingredients” of modified constraint induced therapy? An evidence-based review, recipe, and recommendations, *Restor Neurol Neurosci* 31: 299–309.
  - 16 Teng S, Whitney D (2011). The acuity of echolocation: Spatial resolution in the sighted compared to expert performance, *J Vis Impair Blind* 105 (1): 20.
  - 17 В нейробиологии существует термин «нейромедиатор», которым обозначается химическое вещество-послание, выделяемое нейроном в специализированном синапсе, где оно передается высокоспецифичной клетке. Нейромодулятор,

в отличие от нейромедиатора, — это химическое послание, воздействующее на более обширную популяцию нейронов (или на клетки других типов) и, как правило, вызывающее более масштабные эффекты. Обратите внимание, что одно и то же химическое вещество в зависимости от обстоятельств может выступать как нейромедиатором, так и нейромодулятором.

- 18 Bakin JS, Weinberger NM (1996). Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis, *Proc Natl Acad Sci USA* 93: 11219–11224.
- 19 Высвобождающие ацетилхолин нейроны называются холинергическими; они располагаются почти исключительно в базальных отделах переднего мозга — подкорковых структурах, которые проецируются в кору. Он сильно влияет на центральную нервную систему, например изменяет возбудимость нейронов, модулирует пресинаптическое высвобождение нейротрансмиттеров и координирует возбуждение малых популяций нейронов. См. Picciotto MR, Higley MJ, Mineur YS (2012). Acetylcholine as a neuromodulator: Cholinergic signaling shapes nervous system function and behavior, *Neuron* 76 (1): 116–129; Gu Q (2003). Contribution of acetylcholine to visual cortex plasticity, *Neurobiol Learn Mem* 80: 291–301; Richardson RT, DeLong MR (1991). Electrophysiological studies of the functions of the nucleus basalis in primates, *Adv Exp Med Biol* 295: 233–252; Orsetti M, Casamenti F, Pepeu G (1996). Enhanced acetylcholine release in the hippocampus and cortex during acquisition of an operant behavior, *Brain Res* 724: 89–96. Обратите внимание, что многие нейромодуляторы кратковременно меняют баланс между возбудимостью и торможением; это их свойство дало основания для гипотезы о том, что растормаживание является одним из механизмов, посредством которых нейромодуляция допускает долгосрочные синаптические модификации.
- 20 Hasselmo ME (1995). Neuromodulation and cortical function: Modeling the physiological basis of behavior, *Behav Brain Res* 67: 1–27.
- 21 Данный эффект впервые был продемонстрирован несколько десятков лет назад на взрослых крысах. Когда им давали слушать звуки определенной высоты, сколько-нибудь существенных изменений в их корковом представительстве не происходило. Но когда звук определенной тональности сопровождался стимуляцией холинергического базального ядра, кортикальное представительство данного звука расширялось. См. Kilgard MP, Merzenich MM (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity, *Science* 279: 1714–1718. Обзор исследований на крысах и на людях см. Weinberger NM (2015). New perspectives on the auditory cortex: Learning and memory, *Handb Clin Neurol* 129: 117–147.
- 22 MF, Singer W (1986). Modulation of visual cortical plasticity by acetylcholine and noradrenaline, *Nature* 320: 172–176; Sachdev RNS et al. (1998). Role of the basal forebrain cholinergic projection in somatosensory cortical plasticity, *J Neurophysiol* 79: 3216–3228.
- 23 Conner JM et al. (2003). Lesions of the basal forebrain cholinergic system impair task acquisition and abolish cortical plasticity associated with motor skill learning, *Neuron* 38: 819–829.

- 24 Полнотью это интервью, где Айзек Азимов среди прочего предвидит появление интернета задолго до того, как тот предстал перед нами во всей красе, можно найти на YouTube.
- 25 Brandt A, Eagleman DM (2017). *The Runaway Species* (New York: Catapult).

## Глава 7

- 1 Eagleman DM (2001). Visual illusions and neurobiology, *Nat Rev Neurosci* 2 (12): 920–926.
- 2 Pelah A, Barlow HB (1996). Visual illusion from running, *Nature* 381 (6580): 283; Zadra JR, Proffitt DR (2016). Optic flow is calibrated to walking effort, *Psychon Bull Rev* 23 (5): 1491–1496.
- 3 Эта оптическая иллюзия называется эффект Маккалоу, по имени американского психолога Селесты Маккалоу, открывшей его в 1965 году. См. McCollough C (1965). Color adaptation of edge-detectors in the human visual system, *Science* 149: 1115–1116. Обратите внимание: у дальтоников подобной иллюзии возникнуть не может. Данное последействие зависит от обстоятельств и работает не только в случае ориентированных линий в сочетании с цветом, но и при сочетании движения и цвета, пространственной частоты и цвета и при многих других сочетаниях.
- 4 Jones PD, Holding DH (1975). Extremely long-term persistence of the McCollough effect, *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 1 (4): 323–327.
- 5 Крупные скачки глазных яблок получили название саккады, а скачки поменьше в промежутке между саккадами называют микросаккадами.
- 6 Это так называемое энтоптическое зрение относится к эффектам, создаваемым самим глазом (энтоптический — внутриглазной, расположенный внутри глазного яблока), в отличие от оптических иллюзий, которые возникают из-за интерпретации увиденного мозгом. Об основах иллюзий, порождаемых глазами, см. CW (1978). *Some new entoptic phenomena*, *Vision Res* 18 (12): 1633–1639.
- 7 Это явление — когда человек зрительно воспринимает сеть кровеносных сосудов собственного глаза — впервые отмечено Яном Пуркинье в 1823 году и получило название в его честь — Пуркинье дерево. См. Purkyně J (1823). *Beiträge zur Kenntniss des Sehens in subjectiver Hinsicht, in Beobachtungen und Versuche zur Physiologie der Sinne* (Prague: In Commission der J. G. Calve'schen Buchhandlung).
- 8 Stetson C et al. (2006). Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation, *Neuron* 51 (5): 651–659.
- 9 На месте ученых я бы держал эту любопытную идею про запас — на всякий случай: а вдруг нечто, что, по-видимому, только что появилось, на самом деле представляет собой нечто только что исчезнувшее?
- 10 Kamin LJ (1969). Predictability, surprise, attention, and conditioning, in *Punishment and Aversive Behavior*, ed. BA Campbell and RM Church (New York: Appleton-Century-

- Crofts), 279–296; Bouton ME (2007). Learning and Behavior: A Contemporary Synthesis (Sunderland, Mass.: Sinauer).
- 11 Данный метод постепенного приближения под действием стимула с отклонением от первоначальной скорости или направления называется клинокинезом.
- 12 В темноте палочки и колбочки сетчатки способны различать только четыре градации освещенности и намного больше — при постоянном рассеянном свете. Благодаря сложности и разнообразию механизмов фоторецепторы избегают насыщения и реагируют на увеличенный поток фотонов, регулируя факторы усиления (и скорость восстановления) своих молекулярных каскадов. Вот несколько примеров: изменение срока жизни молекул в биотивном состоянии, изменение доступности связывающих белков, использование других молекул для увеличения срока жизни активированных комплексов и изменение аффинности каналов для связанных с ними лигандов. В более широком масштабе фоторецепторы способны объединять силы благодаря горизонтальным клеткам, которые модулируют связи (щелевые контакты), чтобы менять способ взаимодействия фоторецепторов. См. Arshavsky VY, Burns ME (2012). Photoreceptor signaling: Supporting vision across a wide range of light intensities, J Biol Chem 287 (3): 1620–1626; Chen J et al. (2010). Channel modulation and the mechanism of light adaptation in mouse rods, J Neurosci 30 (48): 16232–16240; Diamond JS (2017). Inhibitory interneurons in the retina: Types, circuitry, and function, Annu Rev Vis Sci 3: 1–24; O'Brien J, Bloomfield SA (2018). Plasticity of retinal gap junctions: Roles in synaptic physiology and disease, Annu Rev Vis Sci 4: 79–100; Demb JB, Singer JH (2015). Functional circuitry of the retina, Annu Rev Vis Sci 1: 263–289.

## Глава 8

- 1 Muckli L, Naumer MJ, Singer W (2009). Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere, Proc Natl Acad Sci 106 (31): 13034–13039. Обратите внимание, что правый глаз у Алисы был ненормально малого размера и почти не видел. Подробнее о ее анамнезе см. в дополнительных материалах к статье.
- 2 Udin SH (1977). Rearrangements of the retinotectal projection in Rana pipiens after unilateral caudal half-tectum ablation, J Comp Neurol 173: 561–582.
- 3 Constantine-Paton M, Law MI (1978). Eye-specific termination bands in tecta of three-eyed frogs, Science 202: 639–641; Law MI, Constantine-Paton M (1981). Anatomy and physiology of experimentally produced striped tecta, J Neurosci 1: 741–759.
- 4 Почему кортикальные территории вместо того, чтобы равномерно перемещаться, идут полосами? Компьютерные модели показывают, что чересполосица естественно проистекает из хеббовской конкуренции между входящими аксонами от разных глаз. Центральная модель формирования полос, видимых в глазных доминантных колонках, была предложена в 1980-х годах. См. Miller KD, Keller JB, Stryker MP (1989). Ocular dominance column development: Analysis and simulation, Science 245 (4918): 605–615. С тех пор модель дорабатывалась

- введением множества других физиологических реалистических подробностей.
- 5 Attardi DG, Sperry RW (1963). Preferential selection of central pathways by regenerating optic fibers, *Exp Neurol* 7 (1): 46–64.
  - 6 Basso A et al. (1989). The role of the right hemisphere in recovery from aphasia: Two case studies, *Cortex* 25: 555–566. В последние десятилетия методы нейропрезентации позволяют ученым наблюдать процесс передачи функций в действии. См. Heiss WD, Thiel A (2006). A proposed regional hierarchy in recovery of post-stroke aphasia, *Brain Lang* 98: 118–123; Pani E et al. (2016). Right hemisphere structures predict poststroke speech fluency, *Neurology* 86: 1574–1581; Xing S et al. (2016). Right hemisphere grey matter structure and language outcome in chronic left-hemisphere stroke, *Brain* 139: 227–241. Клинически наблюдаемые масштабы «сдвига вправо» различаются у разных пациентов по причинам, которые до сих пор находятся в стадии изучения.
  - 7 Wiesel TN, Hubel DH (1963). Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye, *J Neurophysiol* 26: 1003–1017; Gu Q (2003). Contribution of acetylcholine to visual cortex plasticity, *Neurobiol Learn Mem* 80: 291–301; Hubel DH, Wiesel TN (1965). Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint, *J Neurophysiol* 28: 1041–1059. На первых порах подобные эксперименты проводились на котятах и обезьянах; позже технологии дали подтверждение (и это неудивительно), что уроки этих экспериментов применимы для объяснения происходящего в зрительной коре человека.
  - 8 Замечаете аналогию со стратегией, на которой строится индуцированная ограничением двигательная терапия для пациентов после инсульта, когда им обездвиживают здоровую руку, чтобы разрабатывалась пораженная?
  - 9 Это так называемая относительная карта: кисть руки будет представлена рядом с локтем, который на карте разместится рядом с плечом вне зависимости от того, насколько мала доступная им территория.
  - 10 В следующие после открытия Леви-Монтальчини годы нейробиологи открыли все семейство нейротрофических факторов; их общее свойство в том, что они стимулируют выживание и развитие нейронов. В более общем смысле нейротрофины относятся к классу секреции белков, называемых факторами роста. См. Spedding M, Gressens P (2008). *Neurotrophins and cytokines in neuronal plasticity*, Novartis Found Symp 289: 222–233.
  - 11 Zoubine MN et al. (1996). A molecular mechanism for synapse elimination: Novel inhibition of locally generated thrombin delays synapse loss in neonatal mouse muscle, *Dev Biol* 179: 447–457.
  - 12 Sanes JR, Lichtman JW (1999). Development of the vertebrate neuromuscular junction, *Annu Rev Neurosci* 22: 389–442.
  - 13 Вспомните, что случилось в 1933 году в Германии, когда большинство избранных в рейхстаг депутатов представляли или наиболее леворадикальные партии (вроде коммунистов), или наиболее праворадикальные (как нацисты). В результате образовался баланс радикальных политических сил. Какой-

никакой, но все же баланс. Однако в августе 1934 года, после смерти занимавшего тогда пост рейхспрезидента Пауля фон Гинденбурга, Адольф Гитлер объявил себя единоличным главой государства, присвоив себе титулы *Führer und Reichskanzler* (фюрера и рейхсканцлера), и, воспользовавшись своим правом, стал издавать законы. Неудивительно, что первыми законами Гитлер отправил в концлагеря своих политических противников-коммунистов, и образовавшийся гигантский дисбаланс сил стал началом катастрофы для миллионов людей.

- 14 Yamahachi H et al. (2009). Rapid axonal sprouting and pruning accompany functional reorganization in primary visual cortex, *Neuron* 64 (5): 719–729; Buonomano DV, Merzenich MM (1998). Cortical plasticity: From synapses to maps, *Annu Rev Neurosci* 21: 149–186; Pascual-Leone A, Hamilton R (2001). The metamodal organization of the brain, in *Vision: From Neurons to Cognition*, ed. C Casanova and M Ptito (New York: Elsevier Science), 427–445; Pascual-Leone A et al. (2005). The plastic human brain cortex, *Annu Rev Neurosci* 28: 377–401; Merzenich MM et al. (1984). Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys, *J Comp Neurol* 224: 591–605; Pons TP et al. (1991). Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques, *Science* 252: 1857–1860; Sanes JN, Donoghue JP (2000). Plasticity and primary motor cortex, *Annu Rev Neurosci* 23 (1): 393–415.
- 15 Jacobs KM, Donoghue JP (1991). Reshaping the cortical motor map by unmasking latent intracortical connections, *Science* 251 (4996): 944–947; Tremere L et al. (2001). Expansion of receptive fields in raccoon somatosensory cortex *in vivo* by GABA-A receptor antagonism: Implications for cortical reorganization, *Exp Brain Res* 136 (4): 447–455.
- 16 Данный механизм углубляет границы между областями мозга; см., например, Tremere et al. (2001).
- 17 Weiss T et al. (2004). Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block, *Eur J Neurosci* 20: 3413–3423.
- 18 Bavelier D, Neville HJ (2002). Cross-modal plasticity: Where and how? *Nat Rev Neurosci* 3: 443–452.
- 19 Eckert MA et al. (2008). A cross-modal system linking primary auditory and visual cortices: Evidence from intrinsic fMRI connectivity analysis, *Hum Brain Mapp* 29 (7): 848–857; Petro LS, Paton AT, Muckli L (2017). Contextual modulation of primary visual cortex by auditory signals, *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 372 (1714): 20160104.
- 20 Pascual-Leone et al. (2005).
- 21 Darian-Smith C, Gilbert CD (1994). Axonal sprouting accompanies functional reorganization in adult cat striate cortex, *Nature* 368: 737–740; Florence SL, Taub HB, Kaas JH (1998). Large-scale sprouting of cortical connections after peripheral injury in adult macaque monkeys, *Science* 282: 1117–1121. До сих пор больше всего внимания уделяется изменениям в коре, хотя стоит повторить, что долгосрочные перемены в таламусе также могут способствовать медленным и более крупным переменам в кортикальных структурах. См. Jones EG (2000). Cortical and subcortical contributions to activity-dependent plasticity in primate somatosensory

- cortex, Annu Rev Neurosci 23: 1–37; Buonomano, Merzenich (1998). Студентам-нейробиологам следующего поколения: вам предстоит ответить на пока открытый вопрос, как увязать быстрые изменения (проявление спящих нейронных связей) с долговременными изменениями (ростом новых аксонов).
- 22 Merlo LM et al. (2006). Cancer as an evolutionary and ecological process, Nat Rev Cancer 6 (12): 924–935; Sprouffske K et al. (2012). Cancer in light of experimental evolution, Curr Biol 22 (17): R762–R771; Aktipis CA et al. (2015). Cancer across the tree of life: Cooperation and cheating in multicellularity, Philos Trans R Soc B Biol Sci 370 (1673).

## Глава 9

- 1 Teuber HL (1975). Recovery of function after brain injury in man, in Outcome of Severe Damage to the Central Nervous System, ed. R Porter and DW Fitzsimmons (Amsterdam: Elsevier), 159–190.
- 2 В молодом мозге наблюдаются высокие уровни холинергических медиаторов, и, поскольку ингибирующие медиаторы становятся доступны только позже, это обеспечивает мозгу генерализованную пластичность. Взрослый мозг, в отличие от детского, активно подавляет перемены там, где они не должны случатьсяся. Точнее, холинергические эффекты во взрослом мозге модифицируются тормозными нейромедиаторами, что уменьшает или сводит на нет пластичность большинства областей, и мозг меняется только там, где требуется. См. Gopnik A, Schulz L (2004). Mechanisms of theory formation in young children, Trends Cogn Sci 8: 371–377; Schulz LE, Gopnik A (2004). Causal learning across domains, Dev Psychol 40: 162–176. Поскольку молодой мозг способен к глобальным переменам, американский психолог Элисон Гопник называет младенцев «департаментом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ» человечества.
- 3 Gopnik A (2009). The Philosophical Baby: What Children's Minds Tell Us About Truth, Love, and the Meaning of Life (New York: Farrar, Straus & Giroux).
- 4 Описание с некоторой адаптацией взято из Coch D, Fischer KW, Dawson G (2007). Dynamic development of the hemispheric biases in three cases: Cognitive/hemispheric cycles, music, and hemispherectomy, in Human Behavior, Learning, and the Developing Brain (New York: Guilford), 94–97. Такую же операцию успешно проводили и взрослым, — правда, это нетипичные случаи и обычно приводят к худшим исходам, чем у детей. См. Schramm J et al. (2012). Seizure outcome, functional outcome, and quality of life after hemispherectomy in adults, Acta Neurochir 154 (9): 1603–1612.
- 5 Чувствительный период называют также критическим периодом развития.
- 6 Petitto LA, Marentette PF (1991). Babbling in the manual mode: Evidence for the ontogeny of language, Science 251: 1493–1496.
- 7 Lenneberg E (1967). Biological Foundations of Language (New York: Wiley); Johnson JS, Newport EL (1989), Critical period effects in second language learning: The

- influence of maturational state on the acquisition of English as a second language, *Cogn Psychol* 21: 60–99. Обращаю ваше внимание на некоторое противоречие относительно роли пластиности в изучении второго языка; нередки случаи, когда взрослые способны быстрее детей освоить его благодаря когнитивной зрелости, умению и опыту учиться, а также ряду других психологических и социальных факторов, см. Newport (1990) и Snow, Hoefnagel-Hoehle (1978). Однако независимо от навыков обучения второму языку людям более старшего возраста труднее научиться говорить на нем без акцента, в отличие от тех, кто владеет им с детства. См. Asher J, Garcia R (1969), *The optimal age to learn a foreign language*, *Mod Lang J* 53 (5): 334–341.
- 8 Berman N, Murphy EH (1981). The critical period for alteration in cortical binocularity resulting from divergent and convergent strabismus, *Dev Brain Res* 2 (2): 181–202. Косоглазие (медицинское название «страбизм») — состояние, при котором зрительная линия одного глаза отклоняется от рассматриваемого предмета и глаза не могут сфокусироваться на нем — разделяется на сходящееся и расходящееся.
  - 9 Amedi A et al. (2003). Early “visual” cortex activation correlates with superior verbal-memory performance in the blind, *Nat Neurosci* 6: 758–766.
  - 10 Voss P et al. (2006). A positron emission tomography study during auditory localization by late-onset blind individuals, *Neuroreport* 17 (4): 383–388; Voss P et al. (2008). Differential occipital responses in early-and late-blind individuals during a sound-source discrimination task, *Neuroimage* 40 (2): 746–758.
  - 11 Merabet LB et al. (2005). What blindness can tell us about seeing again: Merging neuroplasticity and neuroprostheses, *Nat Rev Neurosci* 6 (1): 71.
  - 12 Иными словами, исследования показали, что, хотя слуховая кора стала выглядеть как зрительная, новые связи сохранили ряд особенностей, типичных для слуховой коры. Например, новые зрительные поля демонстрировали больше точности по право-левой оси, чем вдоль вертикальной; предполагаемая причина в том, что в норме слуховая кора картирует звуковые частоты именно в горизонтальном порядке, по право-левой оси.
  - 13 Persico N, Postlewaite A, Silverman D (2004). The effect of adolescent experience on labor market outcomes: The case of height, *J Polit Econ* 112 (5): 1019–1053. См. также Judge TA, Cable DM (2004). The effect of physical height on workplace success and income: Preliminary test of a theoretical model, *J Appl Psychol* 89 (3): 428–441.
  - 14 Smirnakis et al. (2005). Lack of long-term cortical reorganization after macaque retinal lesions, *Nature* 435 (7040): 300. Данное исследование проводилось на взрослой особи макаки (старше четырех лет); аналогичные результаты, предположительно, должны наблюдаться и у человека.
  - 15 В качестве всего одного из сотен примеров вспомните, что, если вы берете за обычновение пододвигать к себе пищу лопаткой, ваша соматосенсорная кора, равно как и моторная, быстро перестроит свои карты тела, чтобы дополнить длину вашей руки длиной лопатки, даже если вы уже далеко не ребенок. См. Iriki A, Tanaka M, Iwamura Y (1996). Attention-induced neuronal activity in the monkey somatosensory

- cortex revealed by pupillometrics, *Neurosci Res* 25 (2): 173–181; Maravita A, Iriki A (2004). Tools for the body (schema), *Trends Cogn Sci* 8: 79–86.
- 16 Chalupa LM, Dreher B (1991). High precision systems require high precision “blueprints”: A new view regarding the formation of connections in the mammalian visual system, *J Cogn Neurosci* 3 (3): 209–219; Neville H, Bavelier D (2002). Human brain plasticity: Evidence from sensory deprivation and altered language experience, *Prog Brain Res* 138: 177–188.
  - 17 Haldane JBS (1932). *The Causes of Evolution* (New York: Longmans, Green); Via S, Lande R (1985). Genotype-environment interaction and the evolution of phenotypic plasticity, *Evolution* 39: 505–522; Via S, Lande R (1987). Evolution of genetic variability in a spatially heterogeneous environment: Effects of genotype-environment interaction, *Genet Res* 49: 147–156.
  - 18 Snowdon DA (2003). Healthy aging and dementia: Findings from the Nun Study, *Ann Intern Med* 139 (5, pt. 2): 450–454.
  - 19 Когда человек стареет, самое главное для него — придумать, как не дать мозгу «окопаться» в своих когнитивных траншеях. По аналогии наихудшее из всего, что могло бы случиться с ученым, — закоснеть в научных подходах к исследовательским проблемам или ко всей области исследования. Такая напасть может, видимо, объяснить поразительные преимущества людей с энциклопедическими знаниями (например, Бенджамина Франклина), известных выдающимися достижениями во многих областях. Движимые любознательностью, они все время активно осваивают новые области знаний и потому избегают риска попасть в западню одного-единственного образа мышления.

## Глава 10

- 1 Ribot T (1882). *Diseases of the Memory: An Essay in the Positive Psychology* (New York: D. Appleton).
- 2 Hawkins RD, Clark GA, Kandel ER (2006). Operant conditioning of gill withdrawal in *aplysia*, *J Neurosci* 26: 2443–2448.
- 3 Hebb DO (1949). *The Organization of Behavior: A Neuropsychological Theory* (New York: Wiley). Как сформулировал Хебб, «когда аксон клетки А расположен достаточно близко к клетке В, чтобы активировать ее, и многократно или постоянно принимает участие в ее возбуждении, в одной из клеток или в обеих возникают либо некий процесс роста, либо метаболические изменения, в результате чего эффективность клетки А как одной из клеток-возбудителей клетки В возрастает». Несмотря на то что нейробиологи часто говорят о синапсе между клетками А и В, следует иметь в виду, что клетка А, помимо того, имеет связи с другими клетками в диапазоне от С до Z, как и с десятком тысяч других нейронов. Главное здесь в том, что один из этих синапсов может индивидуально менять свою силу, тем самым усиливая одни «межнейронные разговоры» и ослабляя другие.

- 4 Bliss TV, Lømo T (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anaesthetized rabbit following stimulation of the perforant path, *J Physiol (London)* 232 (2): 331–356. На ультрамикроскопическом уровне крошечные каналы в мембране, обладающие чувствительностью к определенным химическим сигналам (их называют NMDA-рецепторами, так как они селективно связывают N-метил-D-аспартат), действуют как детекторы совпадений и реагируют, когда два связанных нейрона возбуждаются в пределах узкого временного окна. Многие постсинаптические мембранны содержат NMDA-рецепторы глутамата, равно как и не-NMDA-рецепторы глутамата. Во время нормальной низкочастотной стимуляции будут открываться только не-NMDA каналы, потому что естественно образующиеся ионы магния блокируют NMDA-каналы. Однако высокочастотная пресинаптическая стимуляция, приводящая к деполяризации постсинаптической мембрани, вытесняет ионы магния, что делает NMDA-рецепторы чувствительными к последующему высвобождению глутамата. Благодаря этому NMDA-рецептор может служить детектором совпадений, поскольку чувствителен к совпадению пресинаптической активности с постсинаптической. Таким образом, NMDA-синапсы представляются классическим образчиком хеббовых синапсов и рассматриваются как ключевые хранилища ассоциаций. Более того, NMDA-рецепторы обладают высокой проницаемостью для кальция, что позволяет им индуцировать систему вторичных мессенджеров, которая в конечном счете способна «разговаривать» с геномом и приводить к долговременным структурным изменениям в постсинаптической клетке. Для большинства типов нейронов NMDA-рецепторы играют решающую роль в индукции долговременного потенцирования (long-term potentiation, LTP). Животное можно обучить выполнению поведенческой задачи, однако при введении химических веществ, действующих как NMDA, способность вспомнить конкретные особенности выполнения задачи, судя по всему, исчезает. Обратите, однако, внимание, что NMDA-рецепторы нужны только для индукции, тогда как в основе поддержания перемен лежат другие механизмы; если говорить очень обобщенно, то требуется синтез новых белков в ядре клетки. Животное можно обучить связывать два стимула (скажем, удар тока и вспышку света), но если белковый синтез заблокирован, то у животного может сформироваться только краткосрочная память, а долгосрочная — нет. В большинстве случаев LTP индуцируется, только когда активность в постсинаптической клетке (деполяризация) связана с активностью в пресинаптической клетке. По отдельности пресинаптическая или постсинаптическая активность в этом смысле неэффективны. Кроме того, LTP специфично для конкретного стимулируемого синапса, и это означает, что каждый отдельный синапс в клетке в принципе мог бы усиливаться или ослабевать в соответствии с историей своей предшествующей активности.
- 5 Относительно роли синапсов в работе памяти см. Nabavi S et al. (2014). Engineering a memory with LTD and LTP, *Nature* 511: 348–352; Bailey CH, Kandel RR (1993). Structural changes accompanying memory storage, *Annu Rev Physiol* 55: 397–426.

- 6 Hopfield J (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities, Proc Natl Acad Sci USA 9: 2554. Поскольку каждый элемент имеет много связей (синапсов) с соседними, в разные моменты времени он может участвовать во многих различных ассоциациях.
- 7 Хотя правило Хебба полезно для формирования ассоциаций, один из его теоретических недостатков в том, что оно нечувствительно к порядку событий. В экспериментах давно доказано, что животные обладают строгой восприимчивостью к порядку сенсорных стимулов; собака Павлова, например, ни за что не сформирует ассоциативную связь, если подача мяса предшествует звонку. Аналогично у животного развивается стойкое отвращение к лакомой пище, если всего один раз после поглощения лакомства оно испытает тошноту, однако, если поменять стимулы местами (сначала тошнота, потом пища), это не повлечет за собой отторжения. Здесь может существовать параллель на биофизическом уровне: изменения синаптической силы зависят от порядка пресинаптической и постсинаптической активности. Если входной сигнал от А предшествует возбуждению нейрона В, синапс усиливается. Если входной сигнал от А поступает после того, как клетка В возбудится, синапс ослабевает. Это правило обучения принято называть пластичностью, зависимой от времени импульса, или правилом временной асимметрии Хебба; оно указывает на значимость сопряжения импульсов по времени. Если конкретнее, то асимметричное правило временно усиливает связи предсказательного характера: если А упорно возбуждается до возбуждения В, это может рассматриваться как успешное предсказание и потому усилиться. См. Rao RP, Sejnowski TJ (2003). Self-organizing neural systems based on predictive learning, Philos Transact A Math Phys Eng Sci 361 (1807): 1149–1175.
- 8 Основные концепции, на которых строится глубокое обучение, известны уже более 30 лет. См. Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ (1988). Learning representations by back-propagating errors, Cognitive Modeling 5 (3): 1. Ключевые открытия в родственной области примерно того же времени см. также Yann LeCun (Яна Лекуна), Yoshua Bengio (Йошуа Бенжио) и Jürgen Schmidhuber (Юргена Шмидхубера).
- 9 Carpenter GA, Grossberg S (1987). Discovering order in chaos: Stable self-organization of neural recognition codes, Ann NY Acad Sci 504: 33–51.
- 10 Bakin JS, Weinberger NM (1996). Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis, Proc Natl Acad Sci USA 93: 11219–11224; Kilgard MP, Merzenich MM (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity, Science 279: 1714–1718.
- 11 Следует отметить, что дефицит памяти у Молисона стал совершенной неожиданностью, поскольку удаление медиального отдела височной доли (гиппокампа и прилежащих структур) в одном полушарии уже некоторое время считалось безопасной процедурой. Краткое описание жизни и клинического случая Молисона см. Corkin S (2013). Permanent Present Tense: The Unforgettable Life of the Amnesic Patient, HM (New York: Basic Books).

- 12 Zola-Morgan SM, Squire LR (1990). The primate hippocampal formation: Evidence for a time-limited role in memory storage, *Science* 250 (4978): 288–290.
- 13 Eichenbaum H (2004). Hippocampus: Cognitive processes and neural representations that underlie declarative memory, *Neuron* 44 (1): 109–120. См. также Frankland PW et al. (2004). The involvement of the anterior cingulate cortex in remote contextual fear memory, *Science* 304 (5672): 881–883.
- 14 Pasupathy A, Miller EK (2005). Different time courses of learning-related activity in the prefrontal cortex and striatum, *Nature* 433 (7028): 873–876. См. также Ravel S, Richmond BJ (2005). Where did the time go?, *Nat Neurosci* 8 (6): 705–707.
- 15 Lisman J et al. (2018). Memory formation depends on both synapse-specific modifications of synaptic strength and cell-specific increases in excitability, *Nat Neurosci* 12: 1; Martin SJ, Grimwood PD, Morris RG (2000). Synaptic plasticity and memory: An evaluation of the hypothesis, *Annu Rev Neurosci* 23: 649–711; Shors TJ, Matzel LD (1997). Long-term potentiation: What's learning got to do with it? *Behav Brain Sci* 20 (4): 597–655. Что касается LTP и LTD, нам еще многое неизвестно о том, каким образом внутриклеточный контекст определяет характер изменения синапса: не все синапсы ведут себя одинаково. На первых порах ученые надеялись, что исход будет определяться особенностями протокола стимуляции синапсов: высокая частота импульсов будет усиливать синапс, низкая, наоборот, ослаблять. Но в экспериментах неоднократно обнаруживалось, что при подаче «правильного» стимула клетка, вопреки ожиданиям, не угнетается, и некоторые исследователи предпочитали отбрасывать эти данные на том основании, что она «больна». Более трезвый анализ экспериментальных данных выявил, что в клетках есть другие факторы, влияющие на изменения в синапсах; большинство из них еще предстоит установить. См. Perrett SP et al. (2001). LTD induction in adult visual cortex: Role of stimulus timing and inhibition, *J Neurosci* 21 (7): 2308–2319.
- 16 Draganski B et al. (2004). Neuroplasticity: Changes in grey matter induced by training, *Nature* 427 (6972): 311–312.
- 17 Например, новые ветвления аксонов или дендритов, рождение новых глиальных клеток или нейронов.
- 18 Boldrini M et al. (2018). Human hippocampal neurogenesis persists throughout aging, *Cell Stem Cell* 22 (4): 589–599; Gould et al. (1999). Neurogenesis in the neocortex of adult primates, *Science* 286 (5439): 548–552; Eriksson et al. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus, *Nat Med* 4 (11): 1313.  
С 1960-х годов бытовало твердое мнение, что млекопитающие рождаются с закрепленным числом нейронов: их количество с возрастом может уменьшаться, но никогда и ни при каких условиях не увеличивается. Однако благодаря повышению чувствительности техники мы теперь знаем, что гиппокамп ежедневно тысячами производит новые нейроны у всех млекопитающих, от мыши до человека. Открытие нейрогенеза привело ученых в изумление только из-за этой давней ошибки; в самом деле, растут же клетки в любой части организма, к тому же давно известно, что мозг пернатых способен к образованию

- новых нейронов. В сущности, птицы отращивают новые нейроны всякий раз, когда заучивают новую трель: см. Nottebohm F (2002). Neuronal replacement in adult brain, *Brain Res Bull* 57 (6): 737–749. В качестве любопытного исторического факта упомяну, что ученые давно подозревали наличие нейрогенеза у млекопитающих, только закрывали на это глаза: см. Altman J (1962). Are new neurons formed in the brains of adult mammals? *Science* 135 (3509): 1127–1128.
- 19 Gould E et al. (1999). Learning enhances adult neurogenesis in the adult hippocampal formation, *Nat Neurosci* 2: 260–265. Так почему же эти чужаки не разрушают уже сформированные воспоминания? Если новые клетки втираются в кортикальную ткань и при этом не портят старых воспоминаний, значит, в нынешней парадигме коннектома (полное описание структуры связей в нервной системе организма) пора кое-что подправить. Одно из предположений состоит в том, что синапсы — вероятно в силу обновления составляющих их молекул — не могут служить надежным хранилищем для выученной долговременной информации (Nottebohm (2002); Bailey, Kandel (1993)). Напротив, для окончательных биофизических изменений требуется совсем новенький нейрон. В этой дискуссионной системе координат сохранение воспоминания предусматривает активацию набора генов, которые ведут к дифференциации клеток. Ее необратимость есть, видимо, то, что нужно для хранения долговременной памяти в течение более длительного периода. Подчеркиваю, что считаю данную гипотезу не более чем дискуссионной главным образом потому, что нам еще многое предстоит понять в нейрогенезе. Какие нейроны ликвидируются (случайные или с ошибками), каково их конкретное место в нейронных цепочках, для чего они предназначены? Иными словами, требуются эксперименты для проверки, действительно ли процесс обучения побуждает определенные нейроны брать на себя роль хранилищ для долговременной памяти — и при этом необратимо подавляет их способность приобретать новую информацию? Важно провести такие эксперименты на животных, чей образ жизни более или менее приближен к естественному: как утверждают, причина, по которой ранние исследования приматов не выявили нейрогенеза (Rakic P (1985). Limits of neurogenesis in primates, *Science* 227 (4690)), в том, что лабораторные обезьяны содержатся в клетках и обделены естественными стимулами. Теперь нам известно, что критическую роль для нейрогенеза играют стимулирующая среда и упражнения, — именно этого нам следовало бы ожидать в теории: чем больше воспоминаний закладывается в систему, тем больше требуется очень долговременных хранилищ.
- 20 Levenson JM, Sweatt JD (2005). Epigenetic mechanisms in memory formation, *Nat Rev Neurosci* 6 (2): 108–118. В другом примере эпигенетическая маркировка генома происходит во время закрепления в долговременной памяти условно-рефлекторного замирания. В пугающих условиях болевой раздражитель и место действия объединяются в пару. Такое сочетание влечет за собой изменение белков, вокруг которых раскручивается и скручивается ДНК. Изменение экспрессии генов, в сущности, может приводить к чему угодно, в том числе к усилиению синаптической функции, возбудимости нейрона и паттернам экспрессии

рецепторов. В сравнении с контекстуальным обусловливанием страха другая форма долговременной памяти, латентное торможение, ведет к изменениям другого гистона, и это указывает на возможность существования еще не открытого гистонового кода, в котором конкретные типы воспоминаний связанны с конкретными паттернами модификации гистона.

- 21 Weaver ICG et al. (2004). Epigenetic programming by maternal behavior, *Nat Neurosci* 7 (8): 847. Эпигенетика изучает изменения ДНК и белков вокруг них, которые обеспечивают изменения в паттернах экспрессии генов в течение жизни. Изменения происходят из-за взаимодействия между геномом и окружающей средой. Данные изменения не кодируются собственно в последовательности ДНК; это позволяет генотипически идентичным клеткам проявлять фенотипическую индивидуальность.
- 22 Brand S (1999). *The Clock of the Long Now: Time and Responsibility* (New York: Basic Books). Идея выделить в цивилизации различные слои на основании темпов их жизни имеет свою предысторию. Все началось с того, что в 1996 году Стюарт Бранд и Брайан Ино построили в студии последнего диаграмму здоровой цивилизации. Но еще раньше, в 1970-е годы, архитектор Фрэнк Даффи придумал условно выделять в коммерческом здании четыре слоя, которые развиваются каждый в своем временному масштабе: комплект (например, расположение мебели, которую можно часто менять), декорации (интерьер, планировка перегородок, которые раз в 5–7 лет меняют или переносят), услуги (скажем, арендующие здание бизнесы, которые меняются где-то раз в 15 лет) и оболочку (собственно здание, которое может простоять много десятков лет).
- 23 В качестве контраргумента можно было бы предположить, что все эти прочие параметры могут существовать просто как способ поддерживать гомеостаз ради одного важного изменения (скажем, для изменения силы синапсов). Сразу хочу внести ясность, что считаю подобное маловероятным. Это все равно что выделить один из слоев жизни общества (например, коммерцию) и утверждать, что все другие перемены в цивилизации не более чем способ поддерживать все слои в сохранности ради того, чтобы у нас всегда имелись новые места для шопинга.
- 24 Нейробиологи не столь эффективно изучают данный феномен и обычно проводят эксперименты не на трепетных влюбленных, а на лабораторных животных, в частности на крысах. Крысу обучают выполнять какое-либо действие в обмен на вознаграждение и отслеживают, какими темпами она достигает совершенства в этом действии. Затем гасят данное поведение устраниением вознаграждающей обратной связи и смотрят, через какое время оно исчезнет. Зато потом, когда крысу повторно обучают «забытому» ею поведению — даже если прошло значительное время, — обнаруживается поразительно большой объем сбереженного знания: во второй раз животное обучается намного быстрее. См. Della-Maggiore V, McIntosh AR (2005). Time course of changes in brain activity and functional connectivity associated with long-term adaptation to a rotational transformation, *J Neurophysiol* 93: 2254–2262; Shadmehr R, Brashers-Krug T (1997). Functional stages in the formation of human long-term motor memory, *J Neurosci*

- 17: 409–419; Landi SM, Baguer F, Della-Maggiore V (2011). One week of motor adaptation induces structural changes in primary motor cortex that predict long-term memory one year later, *J Neurosci* 31: 11808–11813; Yamamoto K, Hoffman DS, Strick PL (2006). Rapid and longlasting plasticity of input-output mapping, *J Neurophysiol* 96: 2797–2801.
- 25 Mulavara AP et al. (2010). Locomotor function after long-duration space flight: Effects and motor learning during recovery, *Exp Brain Res* 202: 649–659.
- 26 Иглмэн Д. Инкогнито. Тайная жизнь мозга. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2019. См. также Barkow J, Cosmides L, Tooby J (1992). *The Adapted Mind: Evolutionary Psychology and the Generation of Culture* (New York: Oxford University Press).
- 27 Полагаю, что именно принцип закрепления нового знания на фундаменте старого объясняет, почему свидетельские показания очевидцев бывают ошибочны или изобилуют неточностями. Каждый свидетель преступления дает показания, сообразуясь с накопленным жизненным опытом и с собственным видением мира. Его внутренние фильтры и предубеждения образуют базовый ландшафт, на который насылаиваются новые впечатления. Именно поэтому неудивительно, что в разных головах потоки новых впечатлений стекают по склонам разного вида и форм. Если говорить более обобщенно, то зависимость настоящего от прошлого составляет основу наших многочисленных различий, начиная с индивидуальных и заканчивая культурными.
- 28 Cytowic RE, Eagleman DM (2009). *Wednesday Is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia* (Cambridge, Mass.: MIT Press).
- 29 Eagleman DM et al. (2007). A standardized test battery for the study of synesthesia, *J Neurosci Methods* 159 (1): 139–145. Synesthesia Battery вы можете найти на [synesthete.org](http://synesthete.org).
- 30 Witthoft N, Winawer J, Eagleman DM (2015). Prevalence of learned grapheme-color pairings in a large online sample of synesthetes, *PLoS One* 10 (3): e0118996.
- 31 Мы предположили, что графемно-цветовая синестезия представляет собой психические образы, обусловленные опытом, то есть ими управляет память. Заметьте, это не противоречит выводу о том, что развитие синестетического ответа зависит от генетической предрасположенности. Что касается происхождения графемно-цветовых ассоциаций у других синестетиков, уместно вспомнить, что не только магнитики на холодильник служили источником привязки букв к цветам; внешнее влияние могли оказывать другие факторы, от раскраски букв в букварях до настенной графики и постеров на стенах классных комнат и школьных гостиных.
- 32 Plummer W (1997). Total erasure, *People*.
- 33 Sherry DF, Schacter DL (1987). The evolution of multiple memory systems, *Psychol Rev* 94 (4): 439; McClelland JL et al. (1995). Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex: Insights from the successes and failures of connectionist models of learning and memory, *Psychol Rev* 102 (3): 419.
- 34 Для быстрого обучения нужна высокая скорость. Однако это ведет к помехам и катастрофическим провалам при попытке сохранить множество воспоминаний.

Оборотная сторона быстрого обучения в том, что, если сила межнейронных связей изменяется медленно, связи усредняются на основании многих порций опыта и тем самым просто воспроизводят статистические закономерности, лежащие в основе реальности. Считалось, что гиппокамп «пропускает» через себя воспоминания, прежде чем они попадут в субстрат коры, однако более свежие данные наводят на предположение, что это происходит параллельно, то есть гиппокамп и кора учатся одновременно. С тех пор как впервые была предложена подобная модель комплементарных систем обучения (McCloskey and Cohen (1989); McClelland et al. (1995); White (1989)), она прошла несколько итераций, которые имели целью выявить, где именно эти комплементарные системы локализуются в мозге. Первоначальная модель предполагала, что это происходит в гиппокампе и коре. См. McClelland et al. (1995). Why there are complementary learning systems in the hippocampus and neocortex, *Psychol Rev* 102: 419–457; O'Reilly et al. (2014). Complementary learning systems, *Cogn Sci* 38: 1229–1248). Более поздние модели предполагали, что обучение различными темпами может полностью протекать в гиппокампе: трисинаптический путь в поле гиппокампа CA<sub>3</sub> благоприятствует выучиванию четко разграниченных эпизодов (имеет быстрый темп обучения), тогда как моносинаптический путь в поле гиппокампа CA<sub>1</sub> хорошо приспособлен для статистического обучения благодаря более медленной скорости. См. Schapiro et al. (2017). Complementary learning systems within the hippocampus: A neural network modeling approach to reconciling episodic memory with statistical learning, *Phil Trans R Soc B* 372 (1711).

## Глава 11

- 1 Coren MJ (2013). A blind fish inspires new eyes and ears for subs, *FastCoExist*.
- 2 Leverington M, Shemdin KN (2017). Principles of Timing in FPGAs.
- 3 Eagleman DM (2008). Human time perception and its illusions, *Curr Opin Neurobiol* 18 (2): 131–136; Stetson C et al. (2006). Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation, *Neuron* 51 (5): 651–659; Parsons B, Novich SD, Eagleman DM (2013). Motor-sensory recalibration modulates perceived simultaneity of cross-modal events, *Front Psychol* 4: 46; Cai M, Stetson C, Eagleman DM (2012). A neural model for temporal order judgments and their active recalibration: A common mechanism for space and time? *Front Psychol* 3: 470.

Обратите внимание, что такой же принцип срабатывает, когда вы вечером снимаете контактные линзы и надеваете очки. В первые моменты ощущается некоторая потеря чувства равновесия. Почему? Потому что очки слегка искажают зрительную картинку, и движения глаз вызывают большее изменение в зрительном поле: выходной сигнал влечет за собой слегка неожиданный входной. Как быстро устранить проблему? Надев очки, чуть-чуть покачать головой. Это позволит нейронам быстро перенастроить моторный ответ под соответствие входному сенсорному сигналу.

## ЖИВОЙ МОЗГ

- 4 Примеры умных (активно-адаптивных) электросетей в больших глубинах и подробностях приводятся в Eagleman DM (2010). Why the Net Matters: Six Easy Ways to Avert the Collapse of Civilization (Edinburgh: Canongate Books).

## Глава 12

- 1 Fowler B (2000). Iceman: Uncovering the Life and Times of a Prehistoric Man Found in an Alpine Glacier (Chicago: U Chicago Press). Описание примененных методов радиологии см. Gostner P et al. (2011). New radiological insights into the life and death of the Tyrolean Iceman, Archaeol Sci 38 (12): 3425–3431. См. также Wierer U et al. (2018). The Iceman's lithic toolkit: Raw material, technology, typology, and use, PLoS One; Maixner F et al. (2016). The 5300-year-old Helicobacter pylori genome of the Iceman, Science 351 (6269): 162–165.
- 2 Streitesky PB, Lynch MJ (2004). The relationship between lead and crime, J Health Soc Behav 45 (2): 214–229; Nevin R (2007). Understanding international crime trends: The legacy of preschool lead exposure, Environ Res 104 (3): 315–336; Reyes JW (2007). Environmental policy as social policy? The impact of childhood lead exposure on crime, Contrib Econ Anal Pol 7 (1).

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Ahuja AK et al. (2011). Blind subjects implanted with the Argus II retinal prosthesis are able to improve performance in a spatial-motor task. *Br J Ophthalmol* 95 (4): 539–543.
- Amedi A, Campodon J, Merabet L, Meijer P, Pascual-Leone A (2006). Towards closing the gap between visual neuroprostheses and sighted restoration: Insights from studying vision, cross-modal plasticity, and sensory substitution. *J Vision* 6 (13): 12.
- Amedi A, Floel A, Knecht S, Zohary E, Cohen LG (2004). Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects. *Nat Neurosci* 7: 1266–1270.
- Amedi A, Raz N, Azulay H, Malach R, Zohary E (2010). Cortical activity during tactile exploration of objects in blind and sighted humans. *Restor Neurol Neurosci* 28 (2): 143–156.
- Amedi A, Raz N, Pianka P, Malach R, Zohary E (2003). Early “visual” cortex activation correlates with superior verbal-memory performance in the blind. *Nat Neurosci* 6: 758–766.
- Amedi A et al. (2007). Shape conveyed by visual-to-auditory sensory substitution activates the lateral occipital complex. *Nat Neurosci* 10: 687–689.
- Ardouin J et al. (2012). FlyVIZ: A novel display device to provide humans with 360° vision by coupling catadioptric camera with HMD. In Proceedings of the 18th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology.
- Arno P, Capelle C, Wanet-Defalque MC, Catalan-Ahumada M, Veraart C (1999). Auditory coding of visual patterns for the blind. *Perception* 28 (8): 1013–1029.
- Arno P et al. (2001). Occipital activation by pattern recognition in the early blind using auditory substitution for vision. *Neuroimage* 13 (4): 632–645.
- Auvray M, Hanneton S, O'Regan JK (2007). Learning to perceive with a visuo-auditory substitution system: Localisation and object recognition with “The vOICe.” *Perception* 36: 416–430.
- Auvray M, Myin E (2009). Perception with compensatory devices: From sensory substitution to sensorimotor extension. *Cogn Sci* 33 (6): 1036–1058.
- Bach-y-Rita P (2004). Tactile sensory substitution studies. *Ann NY Acad Sci* 1013: 83–91.
- Bach-y-Rita P, Collins CC, Saunders F, White B, Scadden L (1969). Vision substitution by tactile image projection. *Nature* 221: 963–964.
- Bach-y-Rita P, Danilov Y, Tyler ME, Grimm RJ (2005). Late human brain plasticity: Vestibular substitution with a tongue BrainPort human-machine interface. *Intellectica* 1 (40): 115–22.

- Bailey CH, Kandel RR (1993). Structural changes accompanying memory storage. *Ann Rev Physiol* 55: 397–426.
- Bakin JS, Weinberger NM (1996). Induction of a physiological memory in the cerebral cortex by stimulation of the nucleus basalis. *Proc Natl Acad Sci USA* 93: 11219–11224.
- Bangert M, Schlaug G (2006). Specialization of the specialized in features of external human brain morphology. *Eur J Neurosci* 24: 1832–1834.
- Barinaga M (1992). The brain remaps its own contours. *Science* 258: 216–218.
- Bear MF, Singer W (1986). Modulation of visual cortical plasticity by acetylcholine and noradrenaline. *Nature* 320: 172–176.
- Bennett EL, Diamond MC, Krech D, Rosenzweig MR (1964). Chemical and anatomical plasticity of brain. *Science* 164: 610–619.
- Bliss TV, Lømo T (1973). Long-lasting potentiation of synaptic transmission in the dentate area of the anesthetized rabbit following stimulation of the perforant path. *J Physiol (London)* 232: 331–356.
- Boldrini M et al. (2018). Human hippocampal neurogenesis persists throughout aging. *Cell Stem Cell* 22 (4): 589–599.
- Borgstein J, Grootendorst C (2002). Half a brain. *Lancet* 359 (9305): 473.
- Borsook D et al. (1998). Acute plasticity in the human somatosensory cortex following amputation. *Neuroreport* 9: 1013–1017.
- Bouton CE et al. (2016). Restoring cortical control of functional movement in a human with quadriplegia. *Nature* 533 (7602): 247.
- Bower TGR (1978). Perceptual development: Object and space. In *Handbook of Perception*, vol. 8, *Perceptual Coding*, edited by EC Carterette and MP Friedman. Academic Press.
- Brandt AK and Eagleman DM (2017). *The Runaway Species*. Catapult Press.
- Bubic A, Striem-Amit E, Amedi A (2010). Large-scale brain plasticity following blindness and the use of sensory substitution devices. In *Multisensory Object Perception in the Primate Brain*, edited by MJ Naumer and J Kaiser, 351–380. Springer.
- Buonomano DV, Merzenich MM (1998). Cortical plasticity: From synapses to maps. *Annu Rev Neurosci* 21: 149–186.
- Burrone J, O'Byrne M, Murthy VN (2002). Multiple forms of synaptic plasticity triggered by selective suppression of activity in individual neurons. *Nature* 420 (6914): 414–418.
- Burton H (2003). Visual cortex activity in early and late blind people. *J Neurosci* 23 (10): 4005–4011.
- Burton H, Snyder AZ, Conturo TE, Akbudak E, Ollinger JM, Raichle ME (2002). Adaptive changes in early and late blind: A fMRI study of Braille reading. *J Neurophysiol* 87: 589–607.
- Cai M, Stetson C, Eagleman DM (2012). A neural model for temporal order judgments and their active recalibration: A common mechanism for space and time? *Front Psychol* 3: 470.
- Cañón Bermúdez GS, Fuchs H, Bischoff L, Fassbender J, Makarov D (2018). Electronic-skin compasses for geomagnetic field-driven artificial magnetoreception and interactive electronics. *Nat Electron* 1 (11): 589–595.

## Дополнительная литература

- Carpenter GA, Grossberg S (1987). Discovering order in chaos: Stable self-organization of neural recognition codes. *Ann NY Acad Sci* 504: 33–51.
- Chebat DR, Harrar V, Kupers R, Maidenbaum S, Amedi A, Ptito M (2018). Sensory substitution and the neural correlates of navigation in blindness. In *Mobility of Visually Impaired People*, 167–200. Springer.
- Chorost M (2011). *World Wide Mind: The Coming Integration of Humanity, Machines, and the Internet*. Free Press.
- Clark SA, Allard T, Jenkins WM, Merzenich MM (1988). Receptive-fields in the body-surface map in adult cortex defined by temporally correlated inputs. *Nature* 332: 444–445.
- Cline H (2003). Sperry and Hebb: Oil and vinegar? *Trends Neurosci* 26 (12): 655–661.
- Cohen LG et al. (1997). Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature* 389: 180–183.
- Collignon O, Lassonde M, Lepore F, Bastien D, Veraart C (2007). Functional cerebral reorganization for auditory spatial processing and auditory substitution of vision in early blind subjects. *Cereb Cortex* 17 (2): 457–465.
- Collignon O, Renier L, Bruyer R, Tranduy D, Veraart C (2006). Improved selective and divided spatial attention in early blind subjects. *Brain Res* 1075 (1): 175–182.
- Collignon O, Voss P, Lassonde M, Lepore F (2009). Cross-modal plasticity for the spatial processing of sounds in visually deprived subjects. *Exp Brain Res* 192 (3): 343–358.
- Conner JM, Culberson A, Packowski C, Chiba AA, Tuszyński MH (2003). Lesions of the basal forebrain cholinergic system impair task acquisition and abolish cortical plasticity associated with motor skill learning. *Neuron* 38: 819–829.
- Constantine-Paton M, Law MI (1978). Eye-specific termination bands in tecta of three-eyed frogs. *Science* 202: 639–641.
- Cronholm B (1951). Phantom limbs in amputees: A study of changes in the integration of centripetal impulses with special reference to referred sensations. *Acta Psychiatr Neurol Scand Suppl* 72: 1–310.
- Cronly-Dillon J, Persaud KC, Blore R (2000). Blind subjects construct conscious mental images of visual scenes encoded in musical form. *Proc Biol Sci* 267 (1458): 2231–2238.
- Cronly-Dillon J, Persaud KC, Gregory RP (1999). The perception of visual images encoded in musical form: A study in cross-modality information transfer. *Proc Biol Sci* 266 (1436): 2427–2433.
- Crowley JC, Katz LC (1999). Development of ocular dominance columns in the absence of retinal input. *Nat Neurosci* 2: 1125–1130.
- Cytowic RE, Eagleman DM (2009). *Wednesday Is Indigo Blue: Discovering the Brain of Synesthesia*. MIT Press.
- Damasio AR, Tranel D (1993). Nouns and verbs are retrieved with differently distributed neural systems. *Proc Natl Acad Sci USA* 90 (11): 4957–4960.
- D'Angiulli A, Waraich P (2002). Enhanced tactile encoding and memory recognition in congenital blindness. *Int J Rehabil Res* 25 (2): 143–145.
- Darian-Smith C, Gilbert CD (1994). Axonal sprouting accompanies functional reorganization in adult cat striate cortex. *Nature* 368: 737–740.

- Day JJ, Sweatt JD (2010). DNA methylation and memory formation. *Nat Neurosci* 13 (11): 1319.
- Diamond M (2001). Response of the brain to enrichment. *An Acad Bras Ciênc* 73: 211–220.
- Donati AR et al. (2016). Long-term training with a brain-machine interface-based gait protocol induces partial neurological recovery in paraplegic patients. *Sci Rep* 6: 30383.
- Dowling J (2008). Current and future prospects for optoelectronic retinal prostheses. *Nature-Eye* 23: 1999–2005.
- 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.
- Driemeyer J, Boyke J, Gaser C, Büchel C, May A (2008). Changes in gray matter induced by learning — revisited. *PLoS One* 3 (7): e2669.
- Dudai Y (2004). The neurobiology of consolidations, or, how stable is the engram? *Ann Rev Psychol* 55: 51–86.
- Eagleman DM (2001). Visual illusions and neurobiology. *Nat Rev Neurosci* 2 (12): 920–926.
- Eagleman DM (2005). Distortions of time during rapid eye movements. *Nat Neurosci* 8 (7): 850–851.
- Eagleman DM (2008). Human time perception and its illusions. *Curr Opin Neurobiol* 18 (2): 131–136.
- Eagleman DM (2009). Silicon immortality: Downloading consciousness into computers. In *This Will Change Everything: Ideas That Will Shape the Future*, edited by J Brockman. Harper Perennial.
- Eagleman DM (2010). The strange mapping between the timing of neural signals and perception. In *Issues of Space and Time in Perception and Action*, edited by R Nijhawan. Cambridge University Press.
- Eagleman DM (2011). The brain on trial. *Atlantic Monthly*. July/August.
- Eagleman DM (2011). *Incognito: The Secret Lives of the Brain*. Pantheon.
- Eagleman DM (2012). Synesthesia in its protean guises. *Br J Psychol* 103 (1): 16–19.
- Eagleman DM (2015). Can we create new senses for humans? TED talks.
- Eagleman DM (2015). *The Brain: The Story of You*. Pantheon.
- Eagleman DM, Downar J (2015). *Brain and Behavior: A Cognitive Neuroscience Perspective*. Oxford University Press.
- Eagleman DM (2018). We will leverage technology to create new senses. *Wired*.
- Eagleman DM, Goodale MA (2009). Why color synesthesia involves more than color. *Trends Cogn Sci* 13 (7): 288–292.
- Eagleman DM, Jacobson JE, Sejnowski TJ (2004). Perceived luminance depends on temporal context. *Nature* 428 (6985): 854.
- Eagleman DM, Kagan AD, Nelson SS, Sagaram D, Sarma AK (2007). A standardized test battery for the study of synesthesia. *J Neurosci Methods* 159 (1): 139–145.
- Eagleman DM, Montague PR (2002). Models of learning and memory. In *Encyclopedia of Cognitive Science*. Macmillan.
- Eagleman DM, Pariyadath V (2009). Is subjective duration a signature of coding efficiency? *Philos Trans R Soc* 364 (1525): 1841–1851.

## Дополнительная литература

- Eagleman DM, Sejnowski TJ (2000). Motion integration and postdiction in visual awareness. *Science* 287 (5460): 2036–2038.
- Eagleman DM, Vaughn DA (2020). A new theory of dream sleep. Under review.
- Edelman GM (1987). *Neural Darwinism: The Theory of Neuronal Group Selection*. Basic Books.
- Elbert T, Pentev C, Wienbruch C, Rockstroh B, Taub E (1995). Increased finger representation of the fingers of the left hand in string players. *Science* 270: 305–306.
- Elbert T, Rockstroh B (2004). Reorganization of human cerebral cortex: The range of changes following use and injury. *Neuroscientist* 10: 129–141.
- Eriksson PS et al. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nat Med* 4 (11): 1313–1317.
- Fauillet L, Dufour H, Pelletier J (2007). Brain of a white-collar worker. *Lancet* 370: 262.
- Finney EM, Fine I, Dobkins KR (2001). Visual stimuli activate auditory cortex in the deaf. *Nat Neurosci* 4 (12): 1171–1173.
- Flor H, Elbert T, Knecht S, Wienbruch C, Pantev C, Birbaumer N, Larbig W, Taub E (1995). Phantom-limb pain as a perceptual correlate of cortical reorganization following arm amputation. *Nature* 375 (6531): 482–484.
- Florence SL, Taub HB, Kaas JH (1998). Large-scale sprouting of cortical connections after peripheral injury in adult macaque monkeys. *Science* 282: 1117–1121.
- Fuhr P, Cohen LG, Dang N, Findley TW, Haghghi S, Oro J, Hallett M (1992). Physiological analysis of motor reorganization following lower limb amputation. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 85 (1): 53–60.
- Fusi S, Drew PJ, Abbott LF (2005). Cascade models of synaptically stored memories. *Neuron* 45 (4): 599–611.
- Gougoux F, Lepore F, Lassonde M, Voss P, Zatorre RJ, Belin P (2004). Neuropsychology: Pitch discrimination in the early blind. *Nature* 430 (6997): 309.
- Gougoux F, Zatorre RJ, Lassonde M, Voss P, Lepore F (2005). A functional neuroimaging study of sound localization: Visual cortex activity predicts performance in early-blind individuals. *PLoS Biol* 3 (2): e27.
- Gould E, Beylin AV, Tanapat P, Reeves A, Shors TJ (1999). Learning enhances adult neurogenesis in the hippocampal formation. *Nat Neurosci* 2: 260–265.
- Gould E, Reeves A, Graziano MSA, Gross C (1999). Neurogenesis in the neocortex of adult primates. *Science* 286: 548–552.
- Gu Q (2003). Contribution of acetylcholine to visual cortex plasticity. *Neurobiol Learn Mem* 80: 291–301.
- Hallett M (1999). Plasticity in the human motor system. *Neuroscientist* 5: 324–332.
- Halligan PW, Marshall JC, Wade DT (1994). Sensory disorganization and perceptual plasticity after limb amputation: A follow-up study. *Neuroreport* 5: 1341–1345.
- Hamilton RH, Keenan JP, Catala MD, Pascual-Leone A (2000). Alexia for Braille following bilateral occipital stroke in an early blind woman. *Neuroreport* 11: 237–240.
- Hamilton RH, Pascual-Leone A, Schlaug G (2004). Absolute pitch in blind musicians. *Neuroreport* 15: 803–806.
- Hasselmo ME (1995). Neuromodulation and cortical function: Modeling the physiological basis of behavior. *Behav Brain Res* 67: 1–27.

- Hawkins J, Blakeslee S (2004). On Intelligence. Times Books.
- Hochberg LR, Serruya MD, Friesz GM, Mukand JA, Saleh M, Caplan AH, Branner A, Chen D, Penn RD, Donoghue JP (2006). Neuronal ensemble control of prosthetic devices by a human with tetraplegia. *Nature* 442: 164–171.
- Hoffman KL, McNaughton BL (2002). Coordinated reactivation of distributed memory traces in primate neocortex. *Science* 297: 2070.
- Hoffmann R et al. (2018). Evaluation of an audio-haptic sensory substitution device for enhancing spatial awareness for the visually impaired. *Optom Vis Sci* 95 (9): 757.
- Hubel DH, Wiesel TN (1965). Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint. *J Neurophysiol* 28: 1041–1059.
- Hurovitz C, Dunn S, Domhoff GW, Fiss H (1999). The dreams of blind men and women: A replication and extension of previous findings. *Dreaming* 9: 183–193.
- Jacobs GH, Williams GA, Cahill H, Nathans J (2007). Emergence of novel color vision in mice engineered to express a human cone photopigment. *Science* 315 (5819): 1723–1725.
- Jameson KA (2009). Tetrachromatic color vision. In *The Oxford Companion to Consciousness*, edited by P Wilken, T Bayne, and A Cleeremans. Oxford University Press.
- Johnson JS, Newport EL (1989). Critical period effects in second language learning: The influence of maturational state on the acquisition of English as a second language. *Cogn Psychol* 21: 60–99.
- Jones EG (2000). Cortical and subcortical contributions to activity-dependent plasticity in primate somatosensory cortex. *Annu Rev Neurosci* 23: 1–37.
- Jones EG, Pons TP (1998). Thalamic and brainstem contributions to large-scale plasticity of primate somatosensory cortex. *Science* 282 (5391): 1121–1125.
- Karl A, Birbaumer N, Lutzenberger W, Cohen LG, Flor H (2001). Reorganization of motor and somatosensory cortex in upper extremity amputees with phantom limb pain. *J Neurosci* 21: 3609–3618.
- Karni A, Meyer G, Jezzard P, Adams M, Turner R, Ungerleider L (1995). Functional MRI evidence for adult motor cortex plasticity during motor skill learning. *Nature* 377: 155–158.
- Kay L (2000). Auditory perception of objects by blind persons, using a bioacoustic high resolution air sonar. *J Acoust Soc Am* 107 (6): 3266–3276.
- Kennedy PR, Bakay RA (1998). Restoration of neural output from a paralyzed patient by a direct brain connection. *Neuroreport* 9: 1707–1711.
- Kilgard MP, Merzenich MM (1998). Cortical map reorganization enabled by nucleus basalis activity. *Science* 279: 1714–1718.
- Knudsen EI (2002). Instructed learning in the auditory localization pathway of the barn owl. *Nature* 417: 322–328.
- Kubanek M, Bobulski J (2018). Device for acoustic support of orientation in the surroundings for blind people. *Sensors* 18 (12): 4309.
- Kuhl PK (2004). Early language acquisition: Cracking the speech code. *Nat Rev Neurosci* 5: 831–843.
- Kupers R, Ptito M (2014). Compensatory plasticity and cross-modal reorganization following early visual deprivation. *Neurosci Biobehav Rev* 41: 36–52.

- Law MI, Constantine-Paton M (1981). Anatomy and physiology of experimentally produced striped tecta. *J Neurosci* 1: 741–759.
- Lenay C, Gapenne O, Hanneton S, Marque C, Genouëlle C (2003). Sensory substitution: Limits and perspectives. In *Touching for Knowing, Cognitive Psychology of Haptic Manual Perception*, edited by Y Hatwell, A Streri, and E Gentaz, 275–292. John Benjamins.
- Levy B (2008). The blind climber who “sees” with his tongue. *Discover*, June 22, 2008.
- Lisman J, Cooper K, Sehgal M, Silva AJ (2018). Memory formation depends on both synapse-specific modifications of synaptic strength and cell-specific increases in excitability. *Nat Neurosci* 12: 1.
- Lobo L et al. (2018). Sensory substitution: Using a vibrotactile device to orient and walk to targets. *J Exp Psychol Appl* 24 (1): 108.
- Macpherson F, ed. (2018). *Sensory Substitution and Augmentation*. Oxford University Press.
- Mancuso K, Hauswirth WW, Li Q, Connor TB, Kuchenbecker JA, Mauck MC, Neitz J, Neitz M (2009). Gene therapy for red-green colour blindness in adult primates. *Nature* 461: 784–788.
- Maravita A, Iriki A (2004). Tools for the body (schema). *Trends Cogn Sci* 8: 79–86.
- Martin SJ, Grimwood PD, Morris RG (2000). Synaptic plasticity and memory: An evaluation of the hypothesis. *Annu Rev Neurosci* 23: 649–711.
- Massiceti D, Hicks SL, van Rheede JJ (2018). Stereosonic vision: Exploring visual-to-auditory sensory substitution mappings in an immersive virtual reality navigation paradigm. *PLoS One* 13 (7).
- Matteau I, Kupers R, Ricciardi E, Pietrini P, Ptito M (2010). Beyond visual, aural, and haptic movement perception: hMT+ is activated by electrotactile motion stimulation of the tongue in sighted and in congenitally blind individuals. *Brain Res Bull* 82 (5–6): 264–270.
- Meijer PB (1992). An experimental system for auditory image representations. *IEEE Trans Biomed Eng* 39 (2): 112–121.
- Merabet LB et al. (2007). Combined activation and deactivation of visual cortex during tactile sensory processing. *J Neurophysiol* 97: 1633–1641.
- Merabet LB et al. (2008). Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch. *PLoS One* 3 (8): e3046. Merabet LB, Pascual-Leone A (2010). Neural reorganization following sensory loss: The opportunity of change. *Nat Rev Neurosci* 11 (1): 44–52.
- Merabet LB, Rizzo J, Amedi A, Somers D, Pascual-Leone A (2005). What blindness can tell us about seeing again: Merging neuroplasticity and neuroprostheses. *Nat Rev Neurosci* 6 (1): 71–77.
- Merzenich MM (1998). Long-term change of mind. *Science* 282 (5391): 1062–1063.
- Merzenich MM et al. (1984). Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys. *J Comp Neurol* 224: 591–605.
- Miller TC, Crosby TW (1979). Musical hallucinations in a deaf elderly patient. *Ann Neurol* 5: 301–302.
- Mitchell SW (1872). *Injuries of Nerves and Their Consequences*. Lippincott.
- Montague PR, Eagleman DM, McClure SM, Berns GS (2002). Reinforcement learning. In *Encyclopedia of Cognitive Science*. Macmillan.

- Moosa AN et al. (2013). Long-term functional outcomes and their predictors after hemispherectomy in 115 children. *Epilepsia* 54 (10): 1771–1779.
- Muckli L, Naumer MJ, Singer W (2009). Bilateral visual field maps in a patient with only one hemisphere. *Proc Natl Acad Sci USA* 106 (31): 13034–13039.
- Muhlau M et al. (2006). Structural brain changes in tinnitus. *Cereb Cortex* 16: 1283–1288.
- Nagel SK, Carl C, Kringe T, Märtin R, König P (2005). Beyond sensory substitution — learning the sixth sense. *J Neural Eng* 2 (4): R13–26.
- Nau AC, Pintar C, Arnoldussen A, Fisher C (2015). Acquisition of visual perception in blind adults using the BrainPort artificial vision device. *Am J Occup Ther* 69 (1): 1–8.
- Neely RM, Piech DK, Santacruz SR, Maharbiz MM, Carmena JM (2018). Recent advances in neural dust: Towards a neural interface platform. *Curr Opin Neurobiol* 50: 64–71.
- Neville H, Bavelier D (2002). Human brain plasticity: Evidence from sensory deprivation and altered language experience. *Prog Brain Res* 138: 177–188.
- Noë A (2009). *Out of Our Heads*. Hill and Wang.
- Norimoto H, Ikegaya Y (2015). Visual cortical prosthesis with a geomagnetic compass restores spatial navigation in blind rats. *Curr Biol* 25 (8): 1091–1095.
- Nottebohm F (2002). Neuronal replacement in adult brain. *Brain Res Bull* 57 (6): 737–749.
- Novich SD, Eagleman DM (2015). Using space and time to encode vibrotactile information: Toward an estimate of the skin's achievable throughput. *Exp Brain Res* 233 (10): 2777–2788.
- Nudo RJ, Milliken GW, Jenkins WM, Merzenich MM (1996). Use-dependent alterations of movement representations in primary motor cortex of adult squirrel monkeys. *J Neurosci* 16 (2): 785–807.
- O'Brien J, Bloomfield SA (2018). Plasticity of retinal gap junctions: Roles in synaptic physiology and disease. *Annu Rev Vis Sci* 4: 79–100.
- O'Regan JK, Noë A (2001). A sensorimotor account of vision and visual consciousness. *Behav Brain Sci* 24 (5): 939–973; 973–1031.
- Orsetti M, Casamenti F, Pepeu G (1996). Enhanced acetylcholine release in the hippocampus and cortex during acquisition of an operant behavior. *Brain Res* 724: 89–96.
- Ortiz-Terán L et al. (2016). Brain plasticity in blind subjects centralizes beyond the modal cortices. *Front Syst Neurosci* 10: 61.
- Ortiz-Terán L et al. (2017). Brain circuit-gene expression relationships and neuroplasticity of multisensory cortices in blind children. *Proc Natl Acad Sci* 114 (26): 6830–6835.
- Osinski D, Hjelme DR (2018). A sensory substitution device inspired by the human visual system. 11th International Conference on Human System Interaction.
- Parsons B, Novich SD, Eagleman DM (2013). Motor-sensory recalibration modulates perceived simultaneity of cross-modal events. *Front Psychol* 4: 46.
- Pascual-Leone A, Amedi A, Fregnani F, Merabet L (2005). The plastic human brain cortex. *Annu Rev Neurosci* 28: 377–401.

## Дополнительная литература

- Pascual-Leone A, Hamilton R (2001). The metamodal organization of the brain. In Vision: From Neurons to Cognition, edited by C Casanova and M Ptito, 427–445. Elsevier Science.
- Pascual-Leone A, Peris M, Tormos JM, Pascual AP, Catala MD (1996). Reorganization of human cortical motor output maps following traumatic forearm amputation. *Neuroreport* 7: 2068–2070.
- Pasupathy A, Miller EK (2005). Different time courses of learning-related activity in the prefrontal cortex and striatum. *Nature* 433 (7028): 873–876.
- Penfield W (1961). Activation of the record of human experience. *Ann R Coll Surg Engl* 29 (2): 77–84.
- Perrett SP, Dudek SM, Eagleman DM, Montague PR, Friedlander MJ (2001). LTD induction in adult visual cortex: Role of stimulus timing and inhibition. *J Neurosci* 21 (7): 2308–2319.
- Petitto LA, Marentette PF (1991). Babbling in the manual mode: Evidence for the ontogeny of language. *Science* 251: 1493–1496.
- Poirier C, De Volder AG, Scheiber C (2007). What neuroimaging tells us about sensory substitution. *Neurosci Biobehav Rev* 31: 1064–1070.
- Pons TP, Garraghty PE, Ommaya AK, Kaas JH, Taub E, Mishkin M (1991). Massive cortical reorganization after sensory deafferentation in adult macaques. *Science* 252: 1857–1860.
- Proulx MJ, Stoerig P, Ludowig E, Knoll I (2008). Seeing “where” through the ears: Effects of learning-by-doing and long-term sensory deprivation on localization based on image-to-sound substitution. *PLoS One* 3 (3): e1840.
- Ptito M, Fumal A, De Noordhout AM, Schoenen J, Gjedde A, Kupers R (2008). TMS of the occipital cortex induces tactile sensations in the fingers of blind Braille readers. *Exp Brain Res* 184 (2): 193–200.
- Rajangam S, Tseng PH, Yin A, Lehw G, Schwarz D, Lebedev MA, Nicolelis MA (2016). Wireless cortical brain-machine interface for whole-body navigation in primates. *Sci Rep* 6: 22170.
- Ramachandran VS (1993). Behavioral and MEG correlates of neural plasticity in the adult human brain. *Proc Natl Acad Sci USA* 90: 10413–10420.
- Ramachandran VS, Rogers-Ramachandran D, Stewart M (1992). Perceptual correlates of massive cortical reorganization. *Science* 258: 1159–1160.
- Rao RP, Sejnowski TJ (2003). Self-organizing neural systems based on predictive learning. *Philos Transact A Math Phys Eng Sci* 361 (1807): 1149–1175.
- Raz N, Amedi A, Zohary E (2005). V1 activation in congenitally blind humans is associated with episodic retrieval. *Cereb Cortex* 15: 1459–1468.
- Renier L, Anurova I, De Volder AG, Carlson S, VanMeter J, Rauschecker JP (2010). Preserved functional specialization for spatial processing in the middle occipital gyrus of the early blind. *Neuron* 68 (1): 138–148.
- Renier L, De Volder AG, Rauschecker JP (2014). Cortical plasticity and preserved function in early blindness. *Neurosci Biobehav Rev* 41: 53–63.
- Ribot T (1882). Diseases of the Memory: An Essay in the Positive Psychology. New York: D. Appleton.

- Roberson ED, Sweatt JD (1999). A biochemical blueprint for long-term memory. *Learn Mem* 6 (4): 381–388.
- Rosenzweig MR, Bennett EL (1996). Psychobiology of plasticity: Effects of training and experience on brain and behavior. *Behav Brain Res* 78: 57–65.
- Royer S, Pare D (2003). Conservation of total synaptic weight through balanced synaptic depression and potentiation. *Nature* 422 (6931): 518–522.
- Sachdev RNS, Lu SM, Wiley RG, Ebner FF (1998). Role of the basal forebrain cholinergic projection in somatosensory cortical plasticity. *J Neurophysiol* 79: 3216–3228.
- Sadato N, Pascual-Leone A, Grafman J, Deiber MP, Ibanez V, Hallett M (1998). Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain* 121: 1213–1229.
- Sampaio E, Maris S, Bach-y-Rita P (2001). Brain plasticity: “Visual” acuity of blind persons via the tongue. *Brain Res* 908 (2): 204–207.
- Sathian K, Stillia R (2010). Cross-modal plasticity of tactile perception in blindness. *Restor Neurol Neurosci* 28 (2): 271–281.
- Schulz LE, Gopnik A (2004). Causal learning across domains. *Dev Psychol* 40: 162–176.
- Schweighofer N, Arbib MA (1998). A model of cerebellar metaplasticity. *Learn Mem* 4 (5): 421–428.
- Sharma J, Angelucci A, Sur M (2000). Induction of visual orientation modules in auditory cortex. *Nature* 404: 841–847.
- Simon M (2019). How I became a robot in London — from 5,000 miles away. *Wired*.
- Singh AK, Phillips F, Merabet LB, Sinha P (2018). Why does the cortex reorganize after sensory loss? *Trends Cogn Sci* 22 (7): 569–582.
- Smirnakis SM, Brewer AA, Schmid MC, Tolias AS, Schüz A, Augath M, Inhoffen W, Wandell BA, Logothetis NK (2005). Lack of long-term cortical reorganization after macaque retinal lesions. *Nature* 435 (7040): 300–307.
- Southwell DG, Froemke RC, Alvarez-Buylla A, Stryker MP, Gandhi SP (2010). Cortical plasticity induced by inhibitory neuron transplantation. *Science* 327 (5969): 1145–1148.
- Spedding M, Gressens P (2008). Neurotrophins and cytokines in neuronal plasticity. *Novartis Found Symp* 289: 222–233; 233–240.
- Steele CJ, Zatorre RJ (2018). Practice makes plasticity. *Nat Neurosci* 21 (12): 1645.
- Stetson C, Cui X, Montague PR, Eagleman DM (2006). Motor-sensory recalibration leads to an illusory reversal of action and sensation. *Neuron* 51 (5): 651–659.
- Tapu R, Mocanu B, Zaharia T (2018). Wearable assistive devices for visually impaired: A state of the art survey. *Pattern Recognit Lett*.
- Thaler L, Goodale MA (2016). Echolocation in humans: An overview. *Wiley Interdiscip Rev Cogn Sci* 7 (6): 382–393.
- Thiel CM, Friston KJ, Dolan RJ (2002). Cholinergic modulation of experience-dependent plasticity in human auditory cortex. *Neuron* 35: 567–574.
- Tulving E, Hayman CAG, Macdonald CA (1991). Long-lasting perceptual priming and semantic learning in amnesia: A case experiment. *J Exp Psychol Learn Mem Cogn* 17: 595–617.
- Udin SH (1977). Rearrangements of the retinotectal projection in *Rana pipiens* after unilateral caudal half-tectum ablation. *J Comp Neurol* 173: 561–582.

## Дополнительная литература

- Velliste M, Perel S, Spalding MC, Whitford AS, Schwartz AB (2008). Cortical control of a prosthetic arm for self-feeding. *Nature* 453: 1098–1101.
- Von Melchner L, Pallas SL, Sur M (2000). Visual behaviour mediated by retinal projections directed to the auditory pathway. *Nature* 404: 871–876.
- Voss P, Gougoux F, Lassonde M, Zatorre RJ, Lepore F (2006). A positron emission tomography study during auditory localization by late-onset blind individuals. *Neuroreport* 17 (4): 383–388.
- Voss P, Gougoux F, Zatorre RJ, Lassonde M, Lepore F (2008). Differential occipital responses in early-and late-blind individuals during a sound-source discrimination task. *Neuroimage* 40 (2): 746–758.
- Weaver IC et al. (2004). Epigenetic programming by maternal behavior. *Nat Neurosci* 7 (8): 847–854.
- Weiss T, Miltner WH, Liepert J, Meissner W, Taub E (2004). Rapid functional plasticity in the primary somatomotor cortex and perceptual changes after nerve block. *Eur J Neurosci* 20: 3413–3423.
- Whitlock JR, Heynen AJ, Shuler MG, Bear MF (2006). Learning induces long-term potentiation in the hippocampus. *Science* 313 (5790): 1093–1097.
- Wiesel TN, Hubel DH (1963). Single-cell responses in striate cortex of kittens deprived of vision in one eye. *J Neurophysiol* 26: 1003–1017.
- Witthoft N, Winawer J, Eagleman DM (2015). Prevalence of learned grapheme-color pairings in a large online sample of synesthetes. *PLoS One* 10 (3).
- Won AS, Bailenson JN, Lanier J (2015). Homuncular flexibility: The human ability to inhabit nonhuman avatars. In *Emerging Trends in the Social and Behavioral Sciences*, edited by R Scott and M Buchmann, 1–6. John Wiley & Sons.
- Yamahachi H, Marik SA, McManus JN, Denk W, Gilbert CD (2009). Rapid axonal sprouting and pruning accompany functional reorganization in primary visual cortex. *Neuron* 64 (5): 719–729.
- Yang TT, Gallen CC, Ramachandran VS, Cobb S, Schwartz BJ, Bloom FE (1994). Non-invasive detection of cerebral plasticity in adult human somatosensory cortex. *Neuroreport* 5: 701–704.
- Zola-Morgan SM, Squire LR (1990). The primate hippocampal formation: Evidence for a time-limited role in memory storage. *Science* 250 (4978): 288–290.

# СПИСОК ИЛЛЮСТРАЦИЙ

- c. 13. Источник: Kliemann D., et al. (2019). Intrinsic functional connectivity of the brain in adults with a single cerebral hemisphere. *Cell Reports*. 2019 Nov 19; 29 (8): 2398–2407. © 2019, with permission from Elsevier
- c. 31. Melissa Lytle / Tampa Bay Times
- c. 35. Печатается с разрешения автора
- c. 41. Печатается с разрешения автора
- c. 45. Печатается с разрешения автора
- c. 46. Печатается с разрешения автора
- c. 56. Печатается с разрешения автора
- c. 65. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot
- c. 67. Печатается с разрешения автора
- c. 68. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot
- c. 70. Sharon Steinmann / AL.com / The Birmingham News
- c. 71. Anthony Souffle / Chicago Tribune / Getty Images (верхнее фото)
- c. 71. Печатается с разрешения KTTC News (нижнее фото)
- c. 74. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot
- c. 76. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot
- c. 81. Печатается с разрешения автора
- c. 82. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot
- c. 84. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot
- c. 86. Ted West / Hulton Archive / Getty Images
- c. 92. Syed Rahman
- c. 94. Syed Rahman and Emily Stevens
- c. 98. Печатается с разрешения автора
- c. 100. Lars Norgaard
- c. 104. Jerome Arduouin
- c. 116. Печатается с разрешения автора
- c. 127. Javier Fadul, Kara Gray, and Culture Pilot

## Список иллюстраций

- c. 130. Mukhopadhyay B, Shukla RM, Mukhopadhyay M, Mandal KC, Haldar P, Benare A (2012). Spectrum of human tails: A report of six cases. *Journal of Indian Association of Pediatric Surgeons*, 17 (1), 23–25. <https://doi.org/10/4103/0971-9261.91082>
- c. 131. Associated Press
- c. 132. USA Archery
- c. 133. Atort Photography
- c. 134. Fabian Lewkowicz
- c. 135. Lionel Hahn / Sipa USA
- c. 137. Destin Sandlin
- c. 139. Victor Zykov / Creative Machines Lab, Columbia University
- c. 145. Andrew B. Schwartz
- c. 146. Gregoire Cirade / Science Photo Library
- c. 148. Печатается с разрешения автора
- c. 150. Andrew B. Schwartz
- c. 163. Печатается с разрешения автора
- c. 173. D. Eagleman and J. Downar, Brain and Behavior, Oxford University Press
- c. 185. Печатается с разрешения автора
- c. 186. IBM
- c. 189. Paul Parker / Science Photo Library
- c. 199. Печатается с разрешения автора
- c. 200. Печатается с разрешения автора
- c. 201. Печатается с разрешения автора
- c. 202. Печатается с разрешения автора
- c. 203. Печатается с разрешения автора
- c. 204. Печатается с разрешения автора
- c. 208. D. Eagleman and J. Downar, Brain and Behavior, Oxford University Press
- c. 209. Wikipedia
- c. 227. Nina Leen / Getty Images
- c. 237. Guy Pearce in Memento © Summit Entertainment
- c. 249. Печатается с разрешения автора
- c. 255. Witthoft N, Winawer J, Eagleman DM (2015). Prevalence of Learned Grapheme-Color Pairings in a Large Online Sample of Synesthetes. *PLoS ONE* 10 (3): e0118996. <https://doi.org/10/1371/journal.pone.0118996>
- c. 258. Печатается с разрешения автора

# БЛАГОДАРНОСТИ

Моей карьере в нейрофизиологии помогали рести очень многие люди, которые разделяли и направляли в нужное русло мое восхищение бесконечно изобретательным инструментарием природы и заразили меня азартом охоты за ответами на интересующие меня вопросы. Это мои родители Сирел и Артур, формировавшие мой мозг в его самые чувствительные периоды; это Рид Монтегю, Терри Сейновски и Фрэнсис Крик, продолжавшие дело моих родителей по ковке моего мозга, пока я учился в магистратуре и позже, когда, только-только получив ученую степень, отрабатывал стипендию на научные исследования и делал первые шаги в науке; это толпы моих друзей, студентов и коллег. Я благодарен моим коллегам по Стэнфорду за то, что давали приют нашим пиршествам разума. Здесь просто не хватит места, чтобы поблагодарить всех моих друзей, кому я обязан своими вдохновениями и плодотворными обсуждениями; скажу, однако, что в их числе Дон Вон, Джонатан Даунар, Бретт Менш и все-все студенты, что прошли за эти годы через мою лабораторию. Я говорю спасибо Тристану Ренцу и Скотту Фримену за финансовую поддержку наших исследований в области сенсорного заимствования, когда никто еще не решался поверить и вложиться в это наше начинание. Я благодарен своему бывшему аспиранту, а ныне деловому партнеру Скотту Новичу за то, что он не жалел сил наравне со мной, чтобы наша технология Neosensory стала реальностью. Я выражают глубокую признательность неизменно прирастающей команде нашей компании Neosensory.

Я глубоко признателен Дэну Франку и Джейми Бингу за то, что они бесподобны как издатели и неизменно готовы протянуть руку поддержки. Я говорю спасибо литературному агентству Wylie — особенно Эндрю, Саре, Джеймсу и Кристине — за мощное безотказное содействие.

Многим людям я признателен за вдумчивое чтение этой книги и от души говорю спасибо вам, Майк Перротта, Шахид Маллик, Шон Джадж, а также замечательным студентам, кто слушает в Стэнфорде мой курс по пластичности мозга.

## Благодарности

Я посвящаю эту книгу своим маленьким сыну Аристотелю и дочке Авиве — с каждой секундой в их маленьких смышеных головках воплощаются принципы пластичности мозга. И еще я выражаю безграничную любовь и признательность моей жене Саре — она мне поддержка и опора, мой помощник и источник моей силы. Любовь и обожание принято облекать в строки лирической поэзии, но не будь живой нейронной проводки мозга, не было бы и любви: благодаря нашей с Сарой взаимной любви мы переписали друг другу мозг.

Наконец, моей глубокой благодарности заслуживают мои студенты и мои читатели по всему миру как неиссякаемый источник вдохновения. Иногда им даже не понять, как восхитительна моя работа, особенно когда я беру на себя завидный труд разложить по полочкам идею, о которой они прежде не имели ни малейшего представления. И тогда наши лица освещаются отблесками истины, дивной и прекрасной.

## ОБ АВТОРЕ

**Дэвид Иглмен** — нейробиолог, автор бестселлеров «Мозг. Ваша личная история» и «Инкогнито. Тайная жизнь мозга». Автор и ведущий телевизионного сериала The Brain, номинированного на премию «Эмми». Приглашенный профессор Стэнфордского университета, член Фонда Гуггенхайма, директор Центра науки и права. Его статьи публиковались в New York Times, Discover Magazine, The Atlantic, Slate, Wired и многих других изданиях. Регулярно участвует в передачах National Public Radio и BBC.

# ГДЕ КУПИТЬ НАШИ КНИГИ

## Специальное предложение для компаний

Если вы хотите купить сразу более 20 книг, например для своих сотрудников или в подарок партнерам, мы готовы обсудить с вами специальные условия работы. Для этого обращайтесь к нашему менеджеру по корпоративным продажам: +7 (495) 792-43-72, b2b@mann-ivanov-ferber.ru.

## Книготорговым организациям

Если вы оптовый покупатель, обратитесь, пожалуйста, к нашему партнеру — торговому дому «Эксмо», который осуществляет поставки во все книготорговые организации.

142701, Московская обл., г. Видное, Белокаменное ш., д. 1;  
+7 (495) 411-50-74; reception@eksmo-sale.ru.

Адрес издательства «Эксмо» 125252,  
Москва, ул. Зорге, д. 1; +7 (495) 411-68-86;  
info@eksmo.ru /www.eksmo.ru

Санкт-Петербург  
СЗКО Санкт-Петербург, 192029, г. Санкт-Петербург,  
пр-т Обуховской Обороны, д. 84е;  
+7 (812) 365-46-03 (04); server@szko.ru

Нижний Новгород  
Филиал «Эксмо» в Нижнем Новгороде, 603094,  
г. Нижний Новгород, ул. Карпинского, д. 29;  
+7 (831) 216-15-91, 216-15-92,  
216-15-93, 216-15-94; reception@eksmonn.ru

Ростов-на-Дону  
Филиал «Эксмо» в Ростове-на-Дону, 344023,  
г. Ростов-на-Дону, ул. Страны Советов, д. 44а;  
+7 (863) 303-62-10; info@mrd.eksmo.ru

Самара  
Филиал «Эксмо» в Самаре, 443052,  
г. Самара, пр-т Кирова, д. 75/1, лит. «Е»;  
+7 (846) 269-66-70 (71...73);  
RDC-samara@mail.ru

Екатеринбург  
Филиал «Эксмо» в Екатеринбурге,  
620024, г. Екатеринбург, ул. Новинская, д. 2щ;  
+7 (343) 272-72-01 (02...08)

Новосибирск  
Филиал «Эксмо» в Новосибирске,  
630015, г. Новосибирск, Комбинатский пер., д. 3;  
+7 (383) 289-91-42; eksmo-nsk@yandex.ru

Хабаровск  
Филиал «Эксмо» в Хабаровске, 680000,  
г. Хабаровск, ул. Фрунзе, д. 22, оф. 703;  
+7 (4212) 910-120; eksmo-khv@mail.ru

Казахстан  
«РДЦ Алматы», 050039,  
г. Алматы, ул. Домбровского, д. 3а;  
+7 (727) 251-59-89 (90...92);  
RDC-almaty@eksmo.kz

Украина  
«Эксмо-Украина», Киев, ООО «Форс Украина»,  
04073, г. Киев, Московский пр-т, д. 9;  
+38 (044) 290-99-44; sales@forsukraine.com



Если у вас есть замечания и комментарии к содержанию, переводу, редактуре и корректуре, то просим написать на [be\\_better@m-i-f.ru](mailto:be_better@m-i-f.ru), так мы быстрее сможем исправить недочеты.

# НЕЙРОБИОЛОГИЯ

# ТЕОРИЯ ИГР

# ЛИНГВИСТИКА

# ЭКОНОМИКА

# АСТРОФИЗИКА

# И МНОГОЕ ДРУГОЕ

# МИФ Научпоп

Узнавай первым о новых книгах,  
скидках и подарках  
из нашей рассылки  
[mif.to/sci-letter](http://mif.to/sci-letter)

Весь научпоп  
на одной странице:  
[mif.to/science](http://mif.to/science)

#mifbooks



*Научно-популярное издание*  
*Серия «Гибкое мышление»*

**Дэвид Иглмен**

**ЖИВОЙ МОЗГ**  
Удивительные факты о нейропластичности  
и возможностях мозга

Руководитель редакционной группы *Светлана Мотылькова*  
Ответственный редактор *Татьяна Рапопорт*  
Литературный редактор *Ольга Мельникова*  
Арт-директор *Алексей Богомолов*  
Дизайн обложки *Алексей Галкин*  
Верстка *Екатерина Матусовская*  
Корректоры *Евлалия Мазаник, Елена Сухова*

ООО «Манн, Иванов и Фербер»  
123104, Россия, г. Москва, Б. Козихинский пер., д. 7, стр. 2  
[mann-ivanov-ferber.ru](http://mann-ivanov-ferber.ru)  
[facebook.com/mifbooks](http://facebook.com/mifbooks)  
[vk.com/mifbooks](http://vk.com/mifbooks)  
[instagram.com/mifbooks](http://instagram.com/mifbooks)



Почему враг памяти — не время, а другие воспоминания? Как может слепой человек научиться видеть при помощи своего языка или глухой человек — слышать при помощи кожи? Почему многим людям в восьмидесятых ошибочно казалось, что страницы книг слегка окрашены в красный? Почему мы каждую ночь видим сны и как это связано с вращением нашей планеты? Что общего между отменой лекарственного препарата и разбитым сердцем?

Ответы на эти и многие другие вопросы — в новой книге известного нейробиолога Дэвида Иглмена. Вас ждут невероятные факты о величайшей технологии, скрывающейся в вашей голове. И это не просто рассказ о том, что такое мозг и как он работает. Вы узнаете, благодаря чему наш мозг способен меняться на протяжении всей жизни и как научиться контролировать его деятельность, чтобы сделать свою жизнь еще лучше.

\*\*\*

Дэвид Иглмен сумел раскрыть тему пластичности мозга настолько наглядно и образно, что с ним не сравнится ни один из известных мне писателей.

Клэр Уилсон, журнал *New Scientist*

