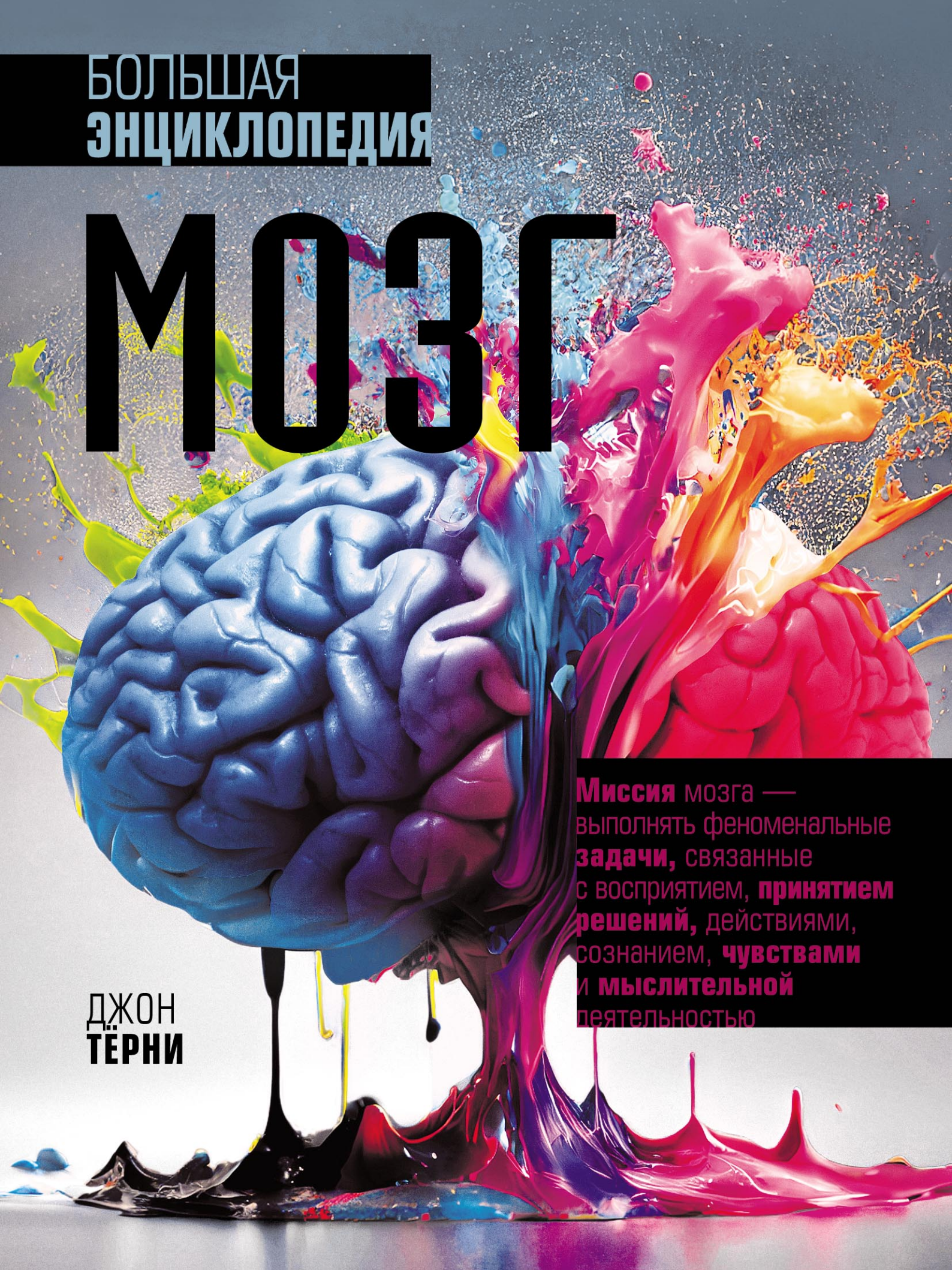
БОЛЬШАЯ
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

МОЗГ



Миссия мозга — выполнять феноменальные **задачи,** связанные с восприятием, **принятием решений,** действиями, сознанием, **чувствами** и **мыслительной** деятельностью

ДЖОН
ТЁРНИ

БОЛЬШАЯ
ЭНЦИКЛОПЕДИЯ

МОЗГ

ИЗДАТЕЛЬСТВО АСТ
МОСКВА

ВСЕ ЗНАНИЯ В ОДНОМ ТОМЕ

УДК 612.82
ББК 28.707
Т35

Перевод оригинального издания
Jon Turney
Cracking Neuroscience

Edited and designed by Whitefox. All rights reserved.

Тёрни, Дж.

Т35 Мозг. Большая энциклопедия / Джон Тёрни; пер. с англ. Е. И. Глебовой. — Москва : Издательство АСТ, 2023. — 208 с. — (Все знания в одном томе).

ISBN 978-5-17-151199-9

Наш мозг — удивительный орган и единственный известный живой объект во Вселенной, способный задумываться о самом себе. Долгое время его изучение приводило лишь к домыслам и предположениям. Революционные неинвазивные технологии позволили заглянуть внутрь мозга и многое понять о его работе, но и сегодня порой кажется, что вопросов больше, чем ответов.

Эта книга подробно рассказывает о том, что мы сегодня знаем о нашем самом главном органе, и поможет приоткрыть завесу тайны, окружающую его.

УДК 612.82
ББК 28.707

ISBN 978-5-17-151199-9

© Jon Turney, 2018
© Octopus Publishing Group Ltd 2018
© Оформление. ООО «Издательство АСТ», 2023

Оглавление

Введение 7

ГЛАВА 1. ВСКРЫВАЯ МОЗГ 9

Путешествие внутрь головы 10
Томас Уиллис исследует головной мозг 11
(Частичная) потеря умственных способностей 12
Потерянный и возвращенный мир 15
Открытие нейронов 16
Мозговые волны 17
Взгляд изнутри 18
Отслеживание крови 20
Постижение смысла 22
Флуоресцентная метка 23
Прошу любить и жаловать: коннектом! 25
В тесноте, да не в обиде 26

ГЛАВА 2. ДАВАЙТЕ ПОЗНАКОМИМСЯ 29

Структура мозга — от анатомии до молекул 30
Названия областей 31
Местонахождение разума 33
Один мозг — два полушария 34
Разделенный мозг 36
За пределами 37
А сколько нейронов видишь ты? 39
Мал, да удал 40
Гиппокамп 42
Еще немного 43
Из каких клеток мы состоим? 45
Встречайте: нейрон! 46
Удивительная сеть 48
Шаг за шагом 50

ГЛАВА 3. МОЗГ, ЖИЗНЬ С ТОБОЙ ПРЕКРАСНА 53

Кому нужен мозг? 54
Разная симметрия 56
Маленькими шажками 57
Размер имеет значение 58
Что наделяет мозг интеллектом? 59
Ты — это то, что ты ешь 61
Прирученный мозг 63
Развитие мозга у эмбриона 64
Мозг новорожденного 66
Критический период 67
Мужской мозг, женский мозг 68
Мозг подростка 70
Зрелость 72
Стареющий мозг 73

ГЛАВА 4. ОСОБАЯ КЛЕТКА 75

Что мы знаем о нейронах 76
Клетка, молекула, атом 76
Природный дуализм 78
Нервный импульс 79
Конец линии — синапс 80
Один потенциал действия — много результатов 81
Сравнение синапсов 82
Многократное воздействие — один результат 84
Область воздействия нейронов 86

ГЛАВА 5. ЧТО ПРОИСХОДИТ? 89

Основанные на чувствах 90
Длинный путь к зрительному образу 90
Сетчатка глаза: место, куда попадает свет . . . 92
Увидеть невидимое 93
Что могут «видеть» нейроны? 94
«Внезапно аудиометр напомнил пулеметную очередь» 95
Одно изображение, множество карт 96
Кодировка лица 98
Создание зрительного образа 98
Позитивные вибрации 100
Обоняние 101
Вкусовые ощущения 102
Осязание 103
Тщательное исследование 105
Дотроньтесь — и я буду там! 106
Смешанные чувства? 107
Осмысление 107

ГЛАВА 6. ДВИЖЕНИЕ И ЭМОЦИИ 111

Древнее и современное 112
Контролируемое движение 113
Взаимосвязь движения и ощущения 114

Прогулка в одиночестве 115
Практика — путь к совершенству 116
У меня есть чувства 118
Нейронная цепь страха 119
Эмоции, разум и тело 120
Зеркальные нейроны 122
Любовь слепа 123
Мой бизнес — мое дитя 124

ГЛАВА 7. МЫ СОСТОИМ ИЗ ВОСПОМИНАНИЙ 127

Механизм памяти 128
От заметок до исследований: не стоит усложнять 130
Детектор совпадений 132
От нейротрансмиттеров до нейромодуляторов 134
Эти клетки знают, но не говорят 135
В поиске энграммы 136
Запоминание или воссоздание? 139

ГЛАВА 8. ЭТА ЗАМЕЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ГОВОРИТЬ 141

Говорящая обезьяна 142
Местопребывание языка 143
От слов к предложениям 144
Почему ты можешь прочитать это? 145
Речь 146
Миг озарения 147

ГЛАВА 9. МАНИПУЛИРУЯ МОЗГОМ 151

Центр удовольствия 152
Дофамин заказывали? 153
Наркотики с историей 154
Где происходит действие? 156
От удовольствия к зависимости 157
Одурманенный любовью 158
Состояния измененного сознания 160
Тестирование: Александр Шульгин и психоделики 161
Переменное течение 162
Замкнуть мозг 163
Глубокая стимуляция мозга 164
Транскраниальная стимуляция 166

ГЛАВА 10. МОЗГ В ДЕПРЕССИИ 169

Сложность установления диагноза 170
От случайного открытия к серотонину 171
Прямое воздействие на депрессию? 174
Недостаточная концентрация 175
Отличие, дефект, разнообразие 177
Борьба с деменцией 180

ГЛАВА 11. АВТОПОРТРЕТ НАУКИ 183

Познай себя 184
Обрати внимание! 185
Воплощение реальности 186
Уснуть, быть может, сны увидеть 187
Измерения сознания 188
Трудная проблема 189
Мы знаем, что ты знаешь 190
Другие умы 191

ГЛАВА 12. БУДУЩИЙ МОЗГ, БУДУЩЕЕ НЕЙРОБИОЛОГИИ 193

Строим новый мозг 194
«Мозг» червя 195
Стремительный рост объема данных 196
Игра со свободным доступом? 198
Управление нейронами 199
Тренировка головного мозга 201
Техномозг 202
Подключение 204
Расширение чувств 205
Так на что же похож наш мозг? 206

Введение

На мой взгляд, наука — наилучший способ познания мира. А нейробиология, в свою очередь, сосредоточена на изучении самого механизма, с помощью которого происходит это познание, — мозга. Данный раздел науки, как и предмет ее изучения, просто завораживает. Мозг — это орган, отвечающий за жизнедеятельность организма. Несмотря на схожий с сердцем, легкими, печенью и почками состав — кровь и ткани, состоящие из хитросплетенных миниатюрных скоплений клеток, — мозг функционирует совершенно иначе: он не качает кровь, не набирает воздух, не выводит шлаки и токсины. Его миссия — выполнять феноменальные задачи, связанные с восприятием, принятием решений, действиями, сознанием, чувствами и мыслительной деятельностью.

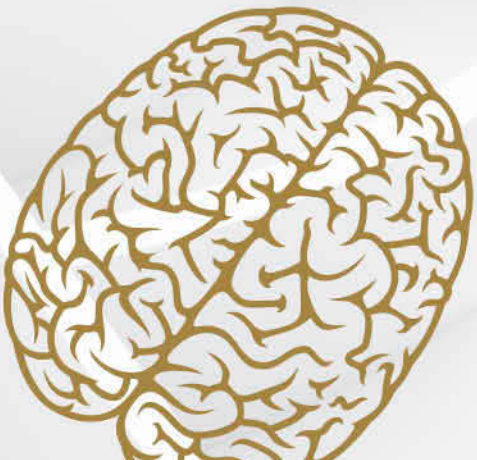
О таком наборе функций другие ткани не могут и мечтать. Более того, даже мечты — и те являются прерогативой мозга. Наш мозг — единственный известный на сегодняшний день живой объект во Вселенной, способный задумываться о самом себе.

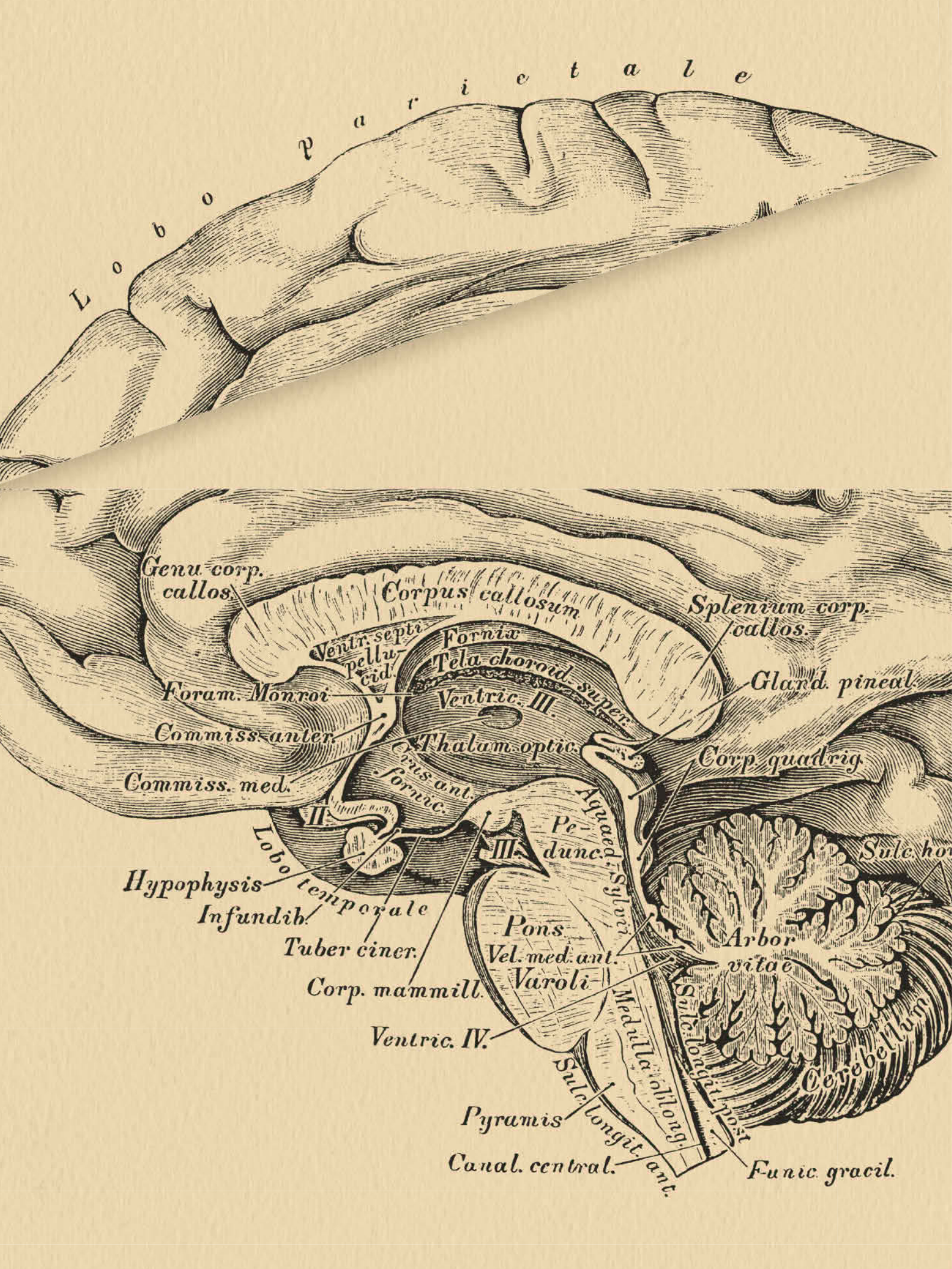
Долгое время изучение мозга приводило лишь к домыслам и предположениям. Удивляет и то, насколько сильно он эволюционировал. Появление революционных технологий, позволяющих заглянуть в недра головного мозга, послужило причиной возникновения нейробиологии. Поразительные выводы, грандиозные идеи, концептуальные прорывы подпитывают и развивают науку. Новым открытиям способствует и модернизация технического оборудования. Вот что происходит с нейробиологией на данный момент.

Усовершенствованные технологии порождают океан новых сведений и данных, охватывающих мозг человека и тех биологических видов, с которыми читатель встретится в книге: червяки, моллюски, кальмары, дрозофилы, пчелы и даже лобстеры.

Исследователи прочесывают этот океан для получения ценной информации о строении и работе головного мозга. Мы в большей степени располагаем знаниями относительно первого аспекта, но ответы зачастую наводят на новые вызывающие интерес вопросы.

Тем временем мозг по-прежнему окутан тайнами и загадками. Нет никакой гарантии, что этот развитый комплекс, состоящий из клеток, химических веществ и электрических импульсов, способен в полной мере осознать собственный механизм деятельности. Изучение мозга — это все еще изучение объекта, способного мыслить, что затрудняет задачу. Однако на сегодняшний день наука подкидывает нам куда больше тем для размышления, чем когда-либо. Итак, начнем.




Lobo parietale
Genu corp. callos.
Corpus callosum
Splenium corp. callos.
Ventr. septi pellucid.
Fornix
Tela choroid. super.
Foram. Monroi
Ventric. III.
Glând. pineal.
Commiss. anter.
Thalam. optic.
Corp. quadrig.
Commiss. med.
Crus ant. fornic.
II
III.
Pe-dunc.
Aquaed. Sylv.
Lobo temporale
Hypophysis
Infundib.
Tuber ciner.
Corp. mammill.
Pons Varoli
Vel. med. ant.
Arbor vitae
Ventric. IV.
Medulla oblong.
Sulc. longit. post.
Cerebellum
Pyramis
Sulc. longit. ant.
Canal. central.
Funic. gracil.

Глава 1

ВСКРЫВАЯ МОЗГ

Путешествие внутрь головы

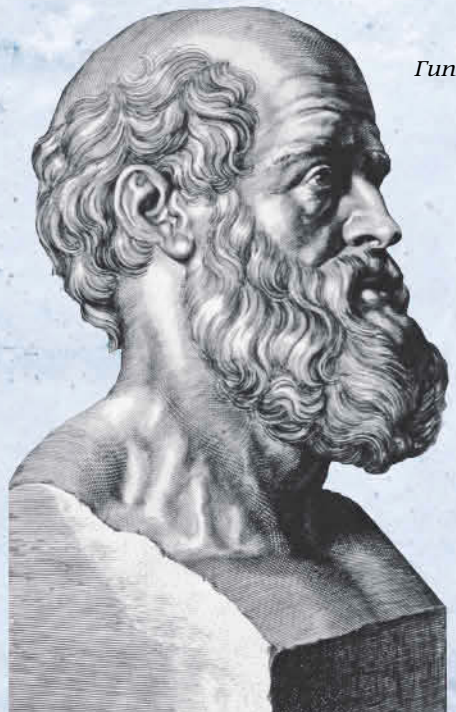
Когда древние австралопитеки в фильме Стэнли Кубрика «2001 год: Космическая одиссея» (1968) используют кости в качестве оружия, в своей первой схватке они целятся в голову. Похоже, это одно из ранних открытий, связанных с мозгом: пробей череп — и жертва больше не встанет! Как это ни прискорбно, методика прижилась и вошла в обиход, о чем свидетельствуют останки древних людей.

Трепанация зародилась в разных уголках земного шара еще тысячелетия назад. Свидетельством проведения данной операции служат древние останки черепов, обнаруженные на территории современной Дании (изображение с одним отверстием) и Новой Зеландии

Некоторые останки демонстрируют примеры более аккуратного вскрытия черепной полости. Сверление отверстий в черепных коробках у живых людей практикуется не менее 7000 лет. Мы мало знаем о причинах, по которым это делалось, но это позволяет предполагать раннее признание того факта, что внутри черепа происходит нечто важное.

В Древней Греции мозг и сердце боролись за право считаться главным жизненно важным органом. Примерно в 400 году до н. э. Гиппократ, отец-основатель западной медицины, утверждал, что мозг отвечает за ощущения. Вероятно, к этому выводу он пришел, увидев на вскрытии сенсорные нервы, входящие в головной мозг. Он также был убежден, что эта странная мясистая масса внутри черепной коробки порождает мыслительную деятельность. Эта гипотеза шла вразрез с канонами прошлого, которые гласили, будто бы вместилищем ощущений и разума является сердце. Аристотель, современник Гиппократа, придерживался традиционных представлений и наделял мозг единственной функцией — охлаждения крови.

Исследования мозга животных позволили Галену, римскому последователю Гиппократа, перейти к теоретическим предположениям о тех частях мозга, которые можно увидеть невооруженным взглядом. Общая картина все же оставалась неясна: внутри головного мозга находятся полости, заполненные жидкостью, или желудочки, и Гален задавался вопросом: может ли жидкость, поступая из нервов в желудочки, порождать ощущения? Идея гидравлического мозга выдержала и более



Гиппократ

Элиус Галенус (Гален)

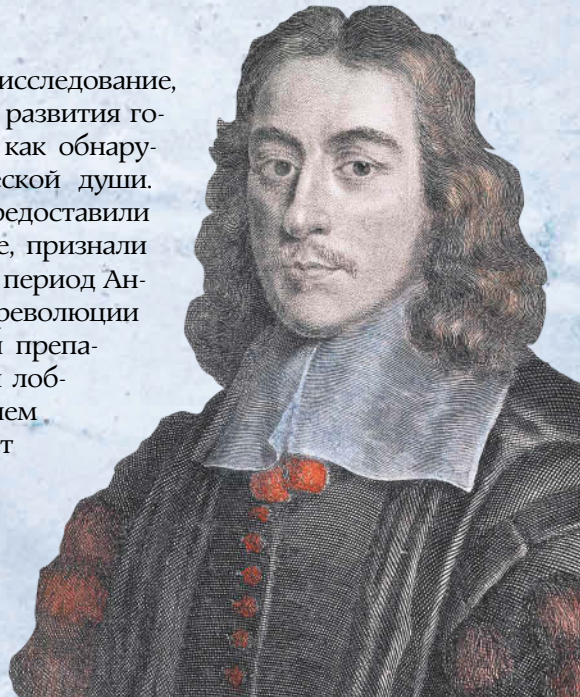
Кадр из фильма Стэнли Кубрика «2001 год: Космическая одиссея»

подробное вскрытие Андреаса Везалия, великого анатома эпохи Возрождения, который исключительно из научных соображений препарировал головы казненных преступников. Вместе с тем именно Гален способствовал обращению внимания ученых больше на подлинное вещество мозга, а не на то, что мы сейчас называем *спинномозговой жидкостью*.

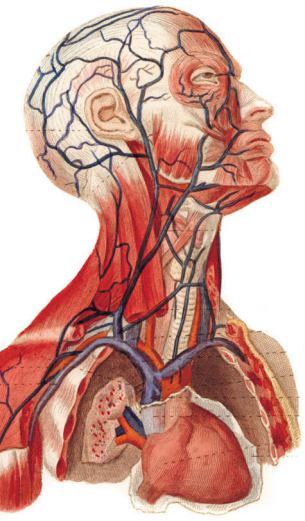
Томас Уиллис исследует головной мозг

«Головной мозг является основным местом расположения разумной души у человека и чувствующей души у животного; он служит источником идей и движений»

Как вы могли правильно заметить, вышеизложенная мысль сочетает в себе мудрость современности и Античности. Британский анатом Томас Уиллис, основатель науки о мозге, в своем труде «Анатомия мозга» (***Cerebri Anatome***, 1664) впервые вводит понятие «***неврология***». В своей теории он оперирует понятиями «душа» и «дух», которые, по мнению его предшественников, располагаются в желудочках головного мозга.



Томас Уиллис провел сравнительно-анатомическое исследование, для того чтобы выявить закономерности строения и развития головного мозга человека и животного и установить, как обнаруженные различия объясняют бессмертие человеческой души. Ему присудили степень доктора медицины и предоставили должность профессора в Оксфордском университете, признали как человека широких интеллектуальных интересов в период Английской буржуазной революции XVII века. После революции у него появился серьезный интерес к вскрытию: он препарировал шелковичных и дождевых червей, устриц и лобстеров, сравнивая полученные результаты со строением человека. Можно представить, как Томас Уиллис дает наставления своему ученику Ричарду Лоуэру, спешно проводящему вскрытие свежего трупа, указывая на детали, которые позже запечатлеет Кристо-

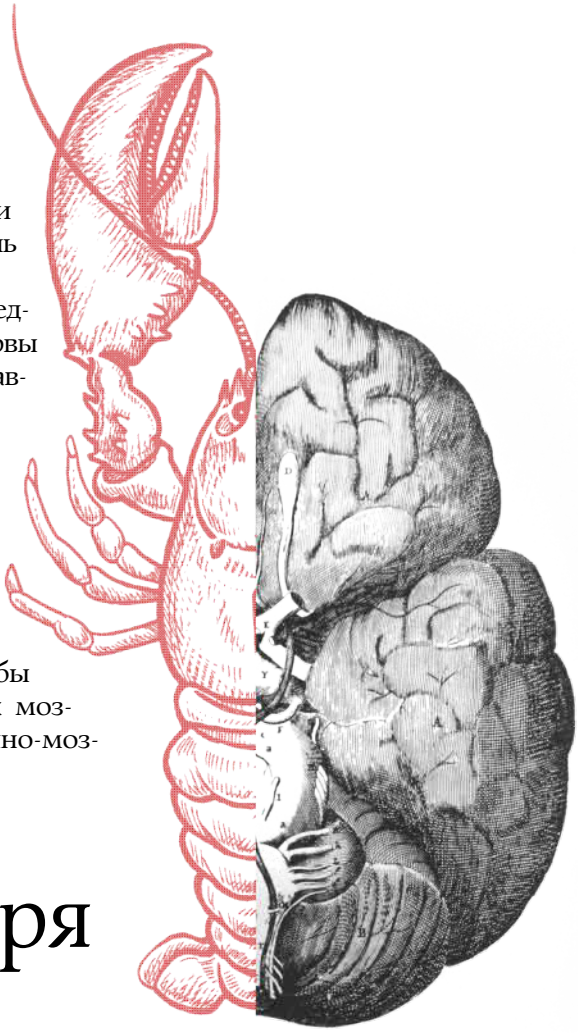


Система кровообращения в области головы и туловища («Полный атлас описательной анатомии». Авт.-сост. доктор Жозеф-Николя Масс, 1864)

фер Рэн. Вероятно, они пробовали сохранить ткани головного мозга в алкоголе и укусе, что было не очень эффективно, а потому работа требовала скорости.

Все же ему удалось уточнить анатомическое наследство предшествующих авторов, указав новые нервы и кровеносные сосуды и обозначив различные составляющие мягких тканей мозга. Это был переломный этап в смещении фокуса с желудочковых жидкостей на другие ключевые структуры мозга.

В связи с этим возник новый подход к теоретизированию. Уиллис связал расстройства психики с различиями, которые он обнаружил при исследовании мозга умерших пациентов. В его идею о природе головных болей широко верили до конца XX века (по мнению Уиллиса, головные боли якобы возникают, когда дополнительный приток крови к мозгу заставляет расширенные сосуды сжимать черепно-мозговые нервы).

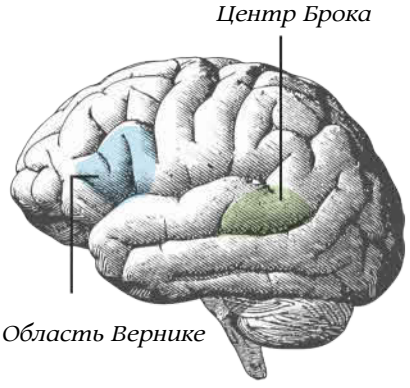


(Частичная) потеря умственных способностей

Аккуратно выполненное вскрытие позволяет составить целостное представление о строении головного мозга. Будучи продолжением спинного мозга, этот сгусток мягких тканей обладает сложной структурой: он состоит из двух морщинистых полушарий, каждое из которых подразделяется на множество легко идентифицируемых областей. К несчастью для студентов, специализирующихся на изучении мозга, они были скрупулезно снабжены латинскими названиями. Ранние анатомы сумели разглядеть ***червь мозжечка*** (червь), ***гиппокамп*** (морской конек), ***колликулус*** (холмик) и даже ***таламус*** (покои).

Возникает вопрос: выполняют ли различные области различные функции? Удаляя участки мозга из-за болезней или травм, ученые все больше приближались к ответу. Однако соотнесение недоста-

Поль Брока



Карл Вернике

ющей части головного мозга с утраченной функцией не исчерпывало вопроса, как и изъятие стартерного двигателя из машины обездвиживает ее, но не означает, что именно этот механизм отвечает за работу всего транспорта. Но нанесение поражений на карту строения головного мозга помогло установить локализацию функций в коре головного мозга, или, проще говоря, сопоставить области мозга с теми активностями, в которых они принимают участие.

Гиппокамп

В 1861 году французский хирург Поль Брока представил результаты диагностики французского пациента Луи Виктора Леборна, который в течение 21 года был практически лишен способности к речи и мог произносить только одно слово — «тан» («пора» в переводе с французского), а в приступах ярости ругался. Посмертное вскрытие показало, что у пациента была повреждена передняя область коры левого полушария. Наблюдение за пациентами с аналогичными случаями нарушения речи после перенесенного инсульта или черепно-мозговой травмы навело ученого на мысль, что *афазия* (потеря речи) наступает в результате повреждения участка, который теперь носит название «*центр Брока*».

В 1870-х годах немецкий ученый Карл Вернике описал иной тип афазии, когда человек сохраняет способность говорить, но при этом чужую речь распознать не может. Такое нарушение функций возникает при повреждении другой области мозга, теперь именуемой *областью Вернике*.

Открытия Поля Брока и Карла Вернике способствовали возобновлению исследований относительно локализации функций в головном мозге. Ученые поставили под сомнение выдвинутую 50 годами ранее теорию Мари-Жан-Пьера Флуранса о том, что, несмотря на прямую связь некоторых функций с корой головного мозга, все они равномерно распределены по его поверхности.

Таламус

У Флуранса же была собственная цель — экспертиза карты локализации функций в коре головного мозга, составленной френологом Францом Йозефом Галлем без внимания к внутренним областям мозга. В результате проведенного эксперимента, который состоял в поочередном удалении областей головного мозга животных и наблюдении за последствиями, Флуранс не обнаружил специфических связей между определенными участками головного мозга и функциями. Его исследование подверглось критике со стороны ученых,

которые обвиняли Флуранса в том, что при удалении мозговой ткани слоями он мог повредить сразу несколько специализированных областей. Однако эксперименты Флуранса положили начало уничтожению френологии как науки и вместе с ней теории локализации. Это была ранняя вспышка все вновь возобновляющейся дискуссии, от чего же зависят способности мозга: от определенных областей или же от органа в целом.

Также Флуранс в своих экспериментах предвосхитил недавнее открытие в нейробиологии. Хотя он знал, что пораженные области головного мозга не подлежат регенерации, некоторые животные восстанавливались после его операций. Сейчас мы можем наблюдать это как раннее свидетельство впечатляющей пластичности мозга: при повреждении одной из его частей ее функции принимает на себя другая часть. Эта способность особенно важна для пациентов, перенесших инсульт.

Мари-Жан-Пьер Флуранс

Иллюстрации из книги Л.-А. Вота «Практический считыватель характера», 1902. В книге демонстрировались взаимосвязи между формой головы, чертами лица и характером человека

ФРЕНОЛОГИЯ

Франц Йозеф Галль был величайшим анатомом, занимавшимся мозгом, со времен Томаса Уиллиса. Но вошел в историю немецкий ученый не из-за превосходных вскрытий, а благодаря идее о возможности установления характера человека по внешнему виду его черепа. В конце XVIII века он разработал великолепную схему, в основу которой легли две концепции: 1) за конкретными областями мозга закреплены определенные психологические черты; 2) сопоставить размеры этих областей мозга можно по выступающим шишкам головы.

Франц Йозеф Галль

При помощи огромного количества инструментов для измерения черепных костей, а также оценок характера в вызывающем стиле Галля он составил карту с 27 особенностями, определяющими личность: милосердие, радость, добросердечность, жажда поживиться, родительская любовь и др. Также он выделял области, которые определяют склонность человека к поэзии, музыке, арифметике, механике и религии.

Схема представленной модели черепа со скрупулезно нанесенными на нее областями с современной точки зрения выглядит довольно странно. В это сложно поверить, но еще совсем недавно, в XIX веке, находились приверженцы данной теории, невзирая на доказательства, свидетельствующие о непричастности деятельности головного мозга к неровностям и впадинам на черепе.

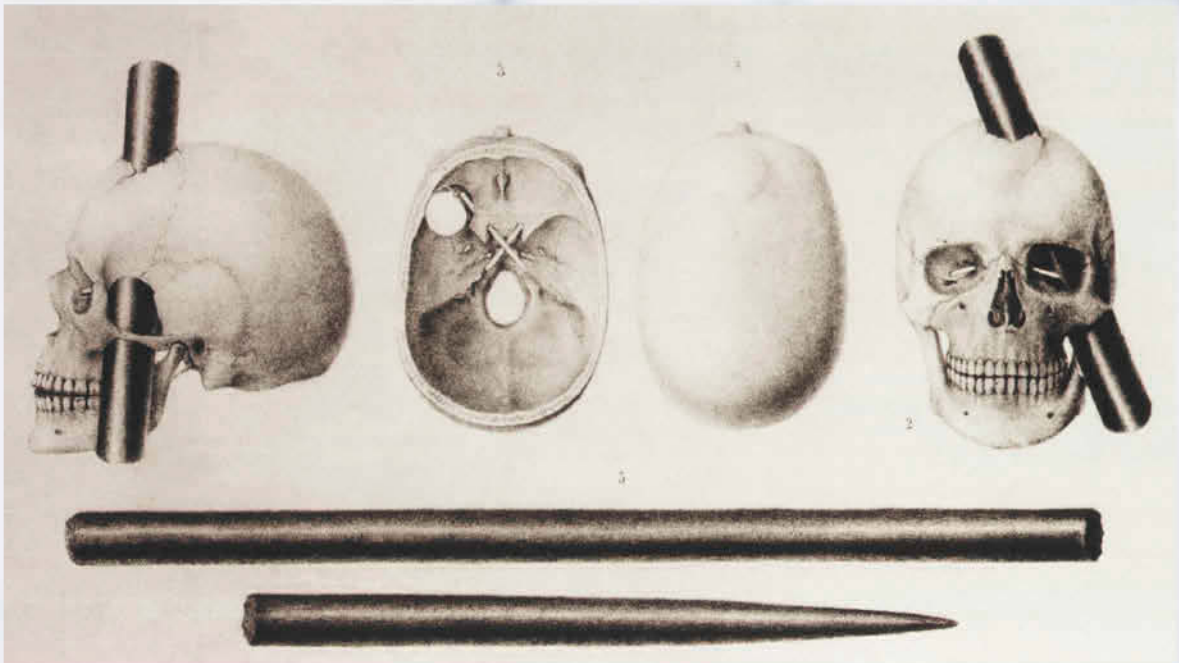
Потерянный и возвращенный мир

Финеас Гейдж

Хоть вклад в науку — это лишь жалкое вознаграждение, несоизмеримое по своей величине с потерей части головного мозга, тем не менее полученные на войне травмы и увечья все же позволили некоторым несчастным обогатить нейробиологию новыми знаниями.

Так, поистине выдающимся стал случай, который произошел в 1848 году в Соединенных Штатах Америки с железнодорожным служащим Финеасом Гейджем: мужчина чудом выжил после сквозного проникновения в его череп металлического стержня для уплотнения скважины взрывчаткой. В результате несчастного случая в личных качествах Гейджа произошли ощутимые изменения: некогда спокойный работник превратился в импульсивного хама. В ходе стихийного «эксперимента» случай с изменившимся характером Гейджа послужил свидетельством того, что мозговое вещество, удаленное из лобной коры, отвечает за нравственное поведение. Позднее историки восстановили хронологию последних лет его жизни — выяснилось, что спустя некоторое время Гейдж продолжил работать. Такое восстановление самочувствия Финеаса вписывается в современные представления о пластичности головного мозга.

Войны XX века не стали исключением и также преподнесли науке множество ценных экземпляров. По окончании Второй мировой войны известный советский психолог и один из основателей отечественной нейропсихологии Александр Романович Лурия занялся активным изучением пациентов, получивших на войне черепно-мозговые травмы различной тяжести. Случай офицера Красной армии Льва Засецкого наглядно продемонстрировал возможности человеческого мозга и пределы его пластичности: офицер получил пулевое ранение в го-



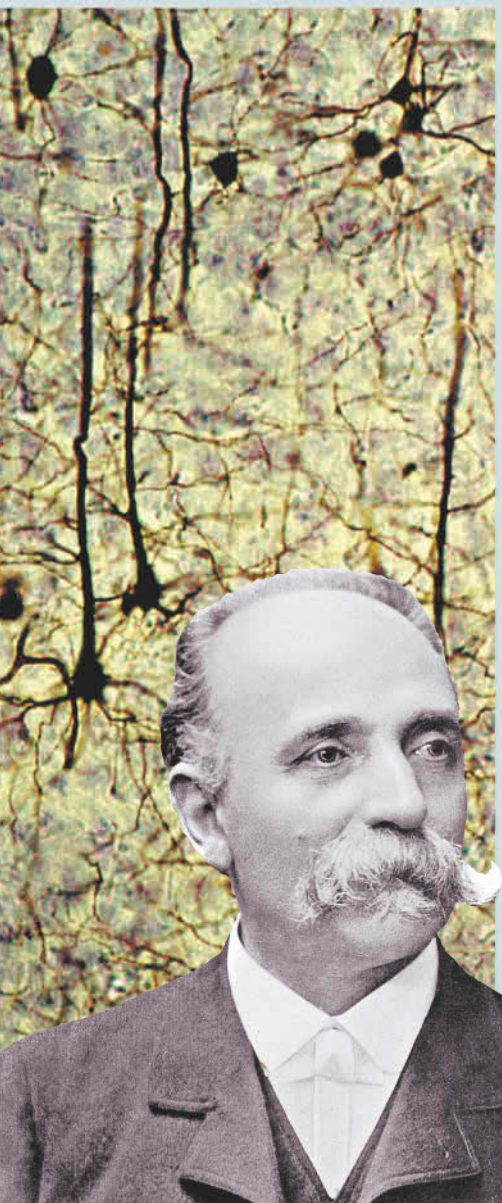
На данной литографии (1850) показана травма головы Финеаса Гейджа, которая способствовала важным достижениям в понимании функционирования человеческого мозга

лову с обширным односторонним повреждением мозга и длительное время провел в коме. Изменения характера, подобные случаю Финеаса Гейджа, обошли его стороной, однако, придя в сознание, Засецкий обнаружил, что он утратил способность читать, писать и распознавать правую часть объектов, включая собственное тело.

Александр Лурия наблюдал за здоровьем офицера на протяжении 25 лет, накопленные за это время материалы легли в основу его книги «Потерянный и возвращенный мир (история одного ранения)». В книге говорится о том, что Засецкому постепенно удалось частично обрести утраченные способности; он даже смог самостоятельно вести собственный дневник, объем которого составил 3000 страниц. Книга А. Р. Лурии содержит выдержки из этого дневника с комментариями автора и описывает непреодолимую тягу вновь прочувствовать этот мир, которая движила пациентом. После ранения Засецкий прожил еще целых 50 лет — до 1993 года; к сожалению, он так и не сумел в полном объеме восстановить речь и зрение. Он оставил пронзительный список вопросов, на которые не было ответов: «Отчего же тогда я болею, отчего не работает моя память, отчего не возвращается зрение, отчего вечно шумит, болит голова, отчего я недослышу, недопонимаю речи людской сразу? Тяжелое это дело — понимать снова мир, потерянный мною из-за ранения и болезни, уже из отдельных мельчайших кусочков собрать его в одно целое».

Александр Лурия

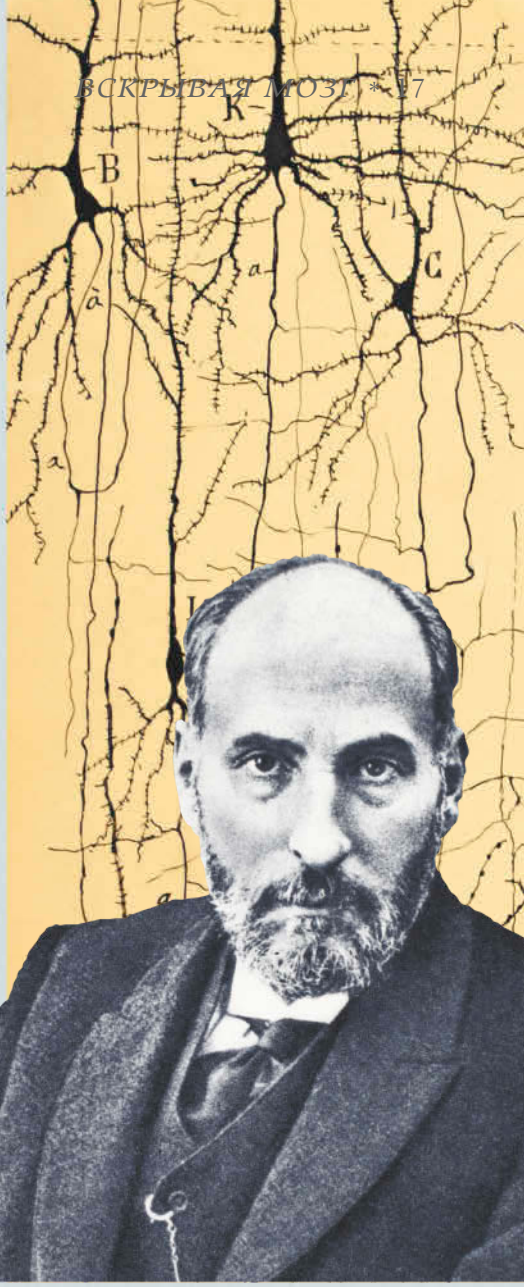
Камилло Гольджи и разработанный им метод окрашивания



Открытие нейронов

Некоторое время ассистентом Томаса Уиллиса был Роберт Гук, который в дальнейшем приобрел известность как популяризатор наблюдений с использованием микроскопа: его труд по микроскопии несколько лет спустя широко обсуждался в научном мире. Поэтому существует вероятность, что после вскрытия Томас Уиллис изучал мозг при помощи именно этого оптического увеличительного инструмента. Однако несмотря на это Уиллис многое не смог увидеть: даже микроскопу оказалось не под силу представить детальное изображение столь искусного переплетения нейронов, других клеток и кровеносных сосудов.

В течение последующих 200 лет картина не становилась яснее, пока не укрепила позиции клеточная теория, утверждавшая, что живые организмы состоят из клеток. В 1873 году итальянский врач Камилло Гольджи изобрел и представил широкой общественности новый метод окрашивания клеток, который позволил продемонстрировать строение нейрона со всеми его тонкими ветвистыми связями. Что особенно важно, при использовании данного метода окрашивалась лишь небольшая часть нейронов в тонком срезе тканей мозга, что позволило определить основную структуру их строения.



Испанец Сантьяго Рамон-и-Кахаль стал широко применять метод Гольджи и вплотную занялся изучением структуры нервной ткани. Он утверждал, что обнаружил более 1 млн нейронов — ничтожную долю от общего объема, однако намного превышающую то число, которое прежде удавалось обнаружить при помощи микроскопа другим исследователям.

Гольджи утверждал, что клеточная теория не применима в отношении головного мозга, и полагал, что все обнаруженные им структуры образуют гигантскую непрерывную сеть; Кахаль же, напротив, был убежден, что каждый нейрон является независимой клеткой. Следя за ходом отдельных волокон, ученый подметил, что хотя многие из них довольно плотно прилегают друг к другу, тем не менее они не сливаются, а чуть соприкасаются, образуя в месте контакта утолщение.

Однако у Кахаля не было доказательств правомерности данной теории, поэтому спор между двумя учеными не был урегулирован вплоть до следующего столетия, когда электронные микроскопы позволили получить сильно увеличенное изображение объекта. Несмотря на противоположные точки зрения на структуру нервной системы, Гольджи и Кахаль поделили между собой Нобелевскую премию по физиологии и медицине (1906). Научной проницательности Кахаля не уступали и его творческие способности: ученый вошел в историю не только как создатель учения о нейронах, но и как автор великого множества прекрасных изображений нервных структур в коре головного мозга, которые и по сей день заслуживают тщательного изучения.

Сантьяго Рамон-и-Кахаль и зарисовка структуры головного мозга под микроскопом, выполненная его рукой

Мозговые волны

Герой готического романа Мэри Шелли доктор Франкенштейн применил так называемую искру жизни, тем самым оживив созданного им монстра. Эта сцена напоминает нам о том, что электричество стало рассматриваться как биологически мощное явление вскоре после того, как подверглось тщательному научному изучению. Сокращения мышц натолкнули ученых на мысль, что нервы являются проводниками генерируемых головным мозгом электрических сигналов.

В киноленте Джеймса Уэйла «Франкенштейн» (1932) наглядно продемонстрирован процесс воздействия электрического тока

В 1870-х годах немецкие физиологи предприняли попытку подать электричество напрямую в мозг. Проведенный эксперимент показал, что небольшой электрод, прикрепленный к открытой части головного мозга собаки, вызывает у нее непроизвольные телодвижения. Систематически изложенные исследования шотландца Дэвида Ферье послужили хорошим подспорьем для развития теории о локализации функций в коре головного мозга. Помимо моторной коры он обнаружил

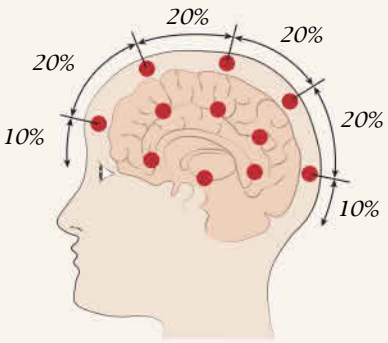
Ханс Бергер

ХАНС БЕРГЕР И ПЕРВАЯ ЭЛЕКТРОЭНЦЕФАЛОГРАММА

Всем известно, что терпение и труд все перетрут. Уже в 19 лет Ханс Бергер с головой погрузился в измерение так называемой физической энергии, после того как в 1892 году во время военной подготовки ему чудом удалось избежать смерти от пушечного залпа. Неожиданно тем же вечером Ханс получил срочную телеграмму от своей сестры, которая так своевременно решила поинтересоваться его здоровьем, что заставило его поверить в существование телепатии.

В поисках ее источника энергии он измерял мозговое кровообращение, а в 1902 году в лаборатории города Йена предпринял первые попытки зарегистрировать электрическую активность головного мозга. Примитивное оборудование того времени не могло зафиксировать электрические сигналы, но Ханс не сдавался. В 1924 году ученый опробовал в деле новый аппарат с двумя большими электродами — листами фольги, прикрепленными на лоб и тыльную часть головы, усилителем с вакуумной трубкой и гальванометром — и наконец обнаружил электрический след на неповрежденном черепе своего сына Клауса.

Ему потребовалось еще пять лет на доработку полученных результатов, и в 1929 году он опубликовал свою первую научную работу под названием «Электроэнцефалография». Немецкая пресса охарактеризовала труд ученого как «зеркало головного мозга», однако широкое признание в научных кругах его открытие получило лишь после подтверждения в 1934 году в Великобритании.



Сегодня ЭЭГ производится при помощи системы электродов

зоны, связанные со зрением и слухом. Это открытие стало еще одним ударом для сторонников френологии, поскольку ни одна из обнаруженных зон не соответствовала их незамысловатым картам строения головного мозга.

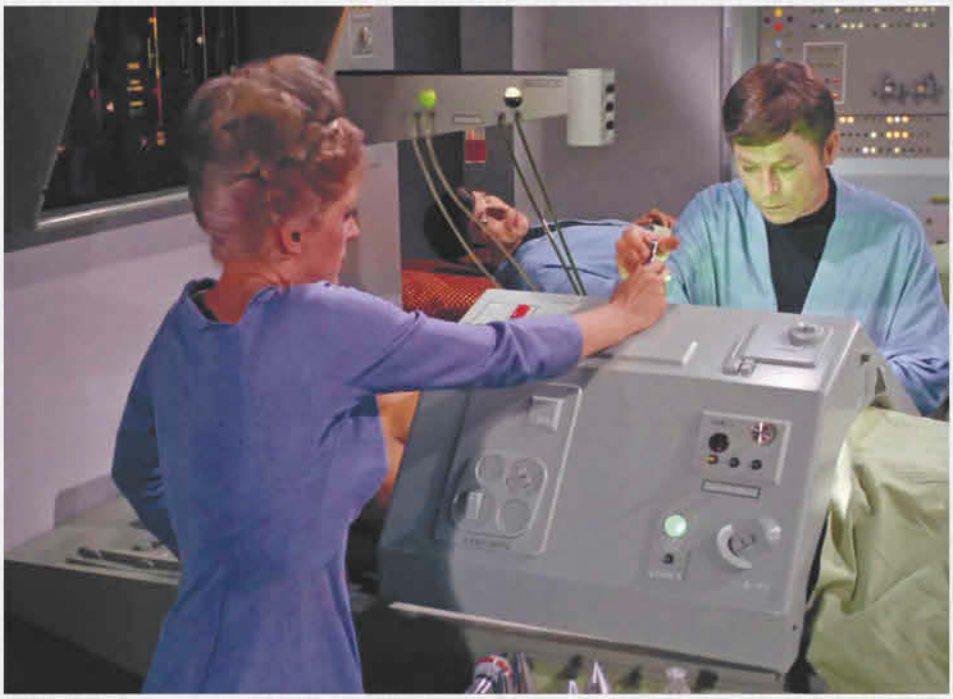
Более точное электрическое зондирование до сих пор остается эффективным инструментом исследования головного мозга, известным как *электроэнцефалограмма* (*ЭЭГ*) — чувствительный метод исследования, который позволяет зарегистрировать внутреннюю электрическую активность нейронной сети.

Взгляд изнутри

Череп, визуализированный посредством КТ и МРТ

Извлечение электрических сигналов посредством ЭЭГ способствовало возникновению нового подхода к нейробиологическим исследованиям — получения информации без непосредственного вмешательства в мозг, т. е. с помощью ***неинвазивных*** методов. Для этого требовалось совершить серьезный научно-технический прорыв, который послужил катализатором развития современной науки о мозге.

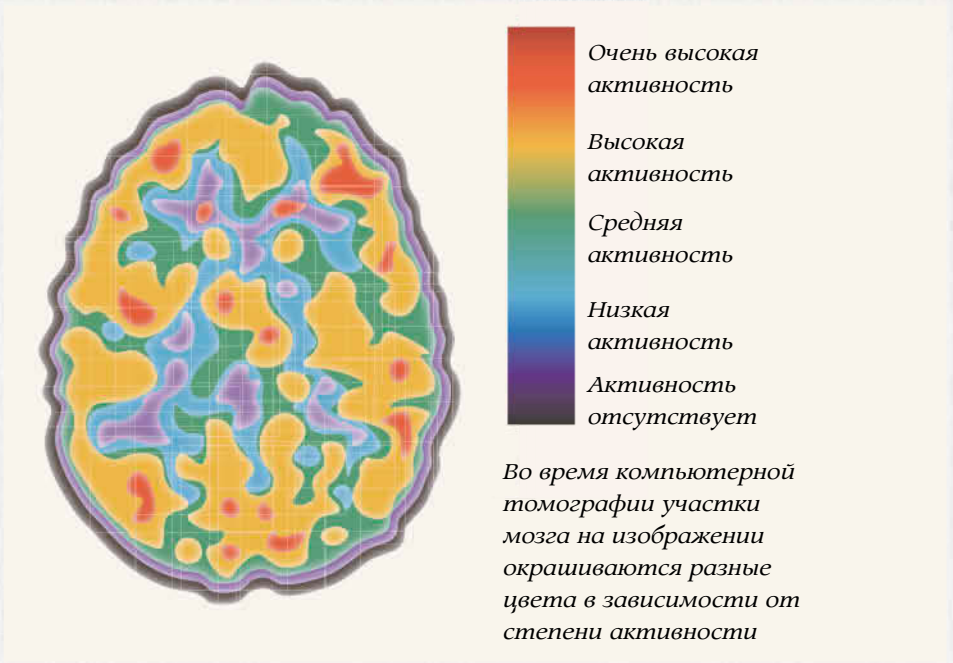
Первым таким катализатором стал метод *компьютерной томографии* (*КТ*) — улучшенный способ диагностики с использованием рентгеновского излучения. В наши дни этот метод широко применяется в медицине. Во время процедуры томограф выполняет серию послойных рентгеновских снимков, которые затем обрабатываются компьютером для моделирования подробного изображения.



Будь у нас в арсенале технологии на уровне «Звездного пути», процесс сканирования мозга был бы проще и лучше

КТ больше подходит для выявления опухолей, чем для исследования мягких тканей, поэтому он нечасто фигурирует в научных исследованиях в области нейробиологии. При диагностике кровеносных сосудов с помощью КТ для повышения контрастности вводят специальные химические реактивы, но в таком случае метод исследования уже нельзя назвать полностью неивазивным.

Еще более полезен в исследованиях метод *магнитно-резонансной томографии* (*МРТ*). Аппарат МРТ, в который человек помещается головой вперед, напоминает один из сверхтехнологичных приборов из сериала «Звездный путь» (англ. *Star Trek*). Перед проведением подобного сканирования предварительно необходимо убедиться, что внутри



Во время компьютерной томографии участки мозга на изображении окрашиваются разные цвета в зависимости от степени активности

и на теле пациента отсутствуют какие-либо металлические предметы, которые могли бы вступить в реакцию с генерируемым внутри аппарата магнитным полем высокой напряженности (например, кардиостимулятор или металлический тазобедренный сустав). МРТ делает возможным получение невероятно информативных изображений мягких тканей, в том числе головного и спинного мозга.

Наряду с МРТ в нейробиологическом арсенале припасены и другие методы исследования. Так, метод ЭЭГ продолжает усложняться и совершенствоваться, появилась *магнитоэнцефалография* (*МЭГ*) — технология, которая также позволяет регистрировать электрическую активность головного мозга. Немало информации можно почерпнуть из результатов стимуляции коры головного мозга при помощи магнитных импульсов (*транскраниальная магнитная стимуляция*).

Высококачественные и высокотехнологичные методы позволяют добыть данные о химической активности головного мозга, но, как и в случае с исследованием рентгеновскими лучами, здесь также требуется инъекция химических реагентов. *Позитронно-эмиссионная томография* позволяет отследить пути передвижения введенных радиоактивных изотопов, имеющих сходство с интересующими исследователей химическими соединениями (обычно *нейротрансмиттерами*).

Создание новых методов и технологий помогает нейробиологам накапливать информацию о состояниях и структурах головного мозга, что всего несколько десятилетий назад было практически невозможно.

Отслеживание крови

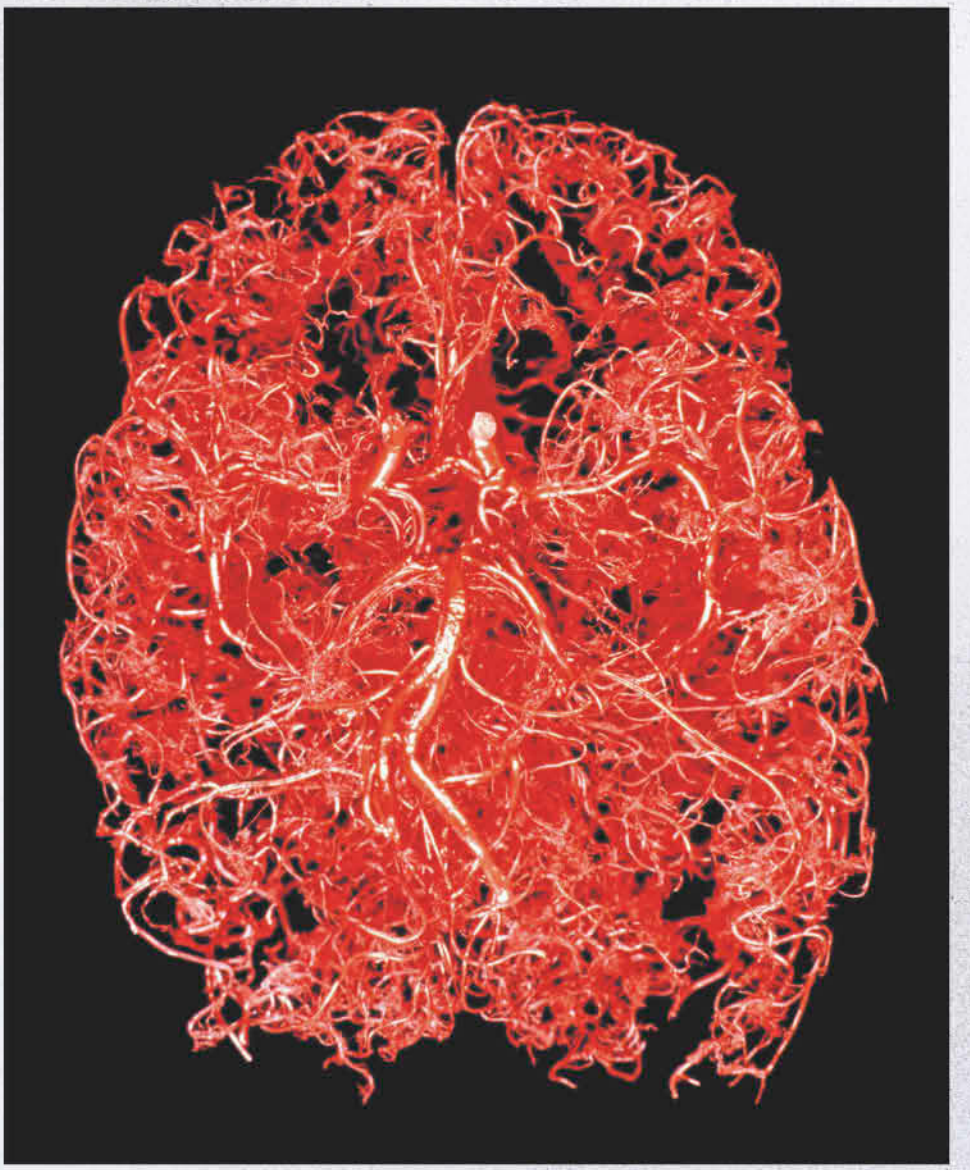
Благодаря возникновению МРТ возможность заглянуть внутрь мозга живого человека перестала быть фантастикой и стала рутинным процессом. Исследование открывает просто невероятную картину! Однако следует помнить о том, результаты могут быть ложными; поэтому важно знать, какие у МРТ существуют сильные и слабые стороны.

Ядерная магнитная часть исследования касается магнитных свойств ядер атомов, особенно ядер водорода (протонов). Физика позволяет обнаружить, какие химические элементы находятся в наблюдаемом объекте и где конкретно. Обычная МРТ дает очень подробную структурную информацию. Другим излюбленным нейробиологией методом является *функциональная МРТ* (*фМРТ*), которая передает данные о кровотоке и содержащемся в нем кислороде. Кислород поставляет организму энергию, так что увеличение объемов поступающего кислорода свидетельствует о том, что какой-то из областей нужно больше энергии. Нейроны нуждаются в энергии для передачи импульса и высвобождения нейротрансмиттеров; усиление их активности приводит к потреблению большего объема кислорода, приносимого с потоком крови, а фМРТ позволяет определить место, в котором происходит эта активность.

Мы знаем, что мозг точно и быстро регулирует кровоснабжение и даже обладает способностью предвидеть, какая из областей проявит свою активность. Но тем не менее сигнал фМРТ является опосредованным. Фактически же активность клеток головного мозга преимущественно электрическая.

И хотя МРТ обладает довольно хорошим пространственным разрешением, в самой маленькой определяемой области находятся сотни тысяч нейронов. Требуется несколько секунд, чтобы зафиксировать увеличение кровотока, в то время как нейроны работают гораздо быстрее. Все это указывает на излишнюю упрощенность подобных умозаключений: «Приток крови к определенной области головного мозга усиливается, если находящийся в сканере человек делает X или думает об X, значит, эта область мозга отвечает за X».

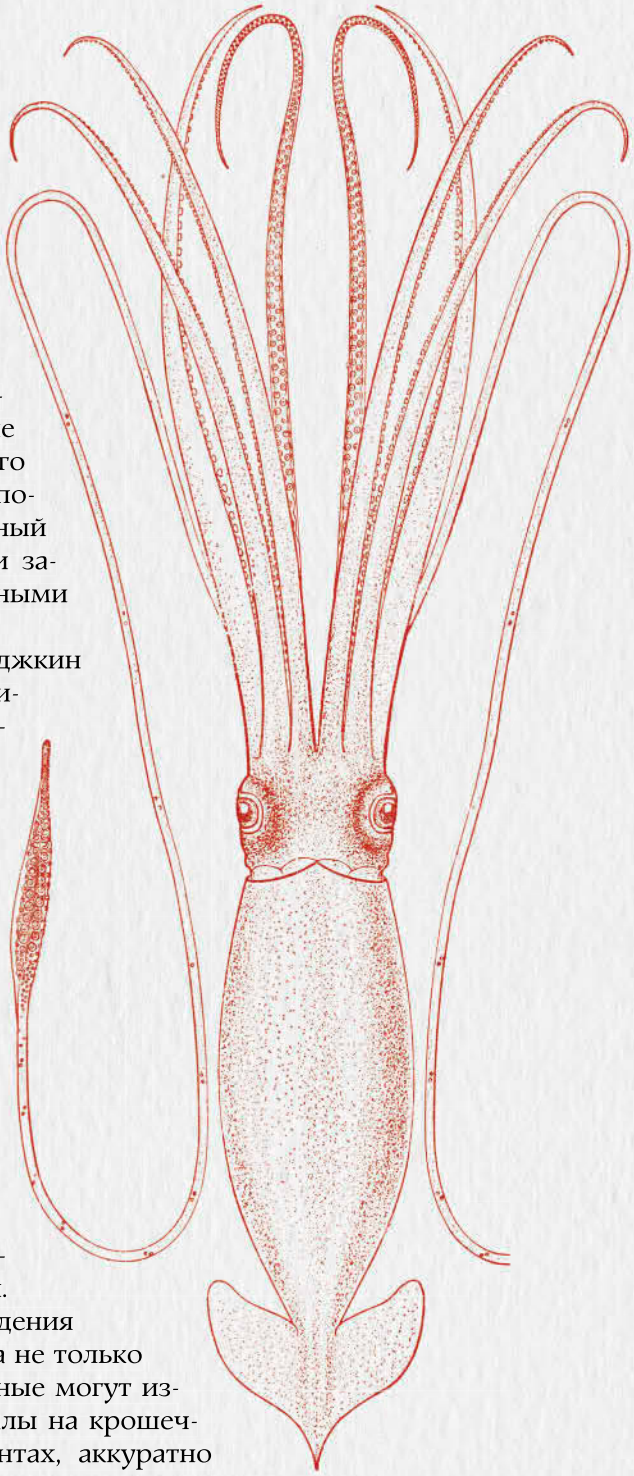
Такие результаты следует рассматривать с разных сторон. Сколько случаев было изучено? Сравнивались ли испытуемые с изменениями в строении соответствующих частей мозга? Проводилось ли сравнение с результатами, полученными другими методами, например с помощью прямой регистрации электрической активности?



Литой слепок системы кровоснабжения мозга

Постижение смысла

Умение получать данные о работе головного мозга извне бесценно. Тем не менее, если вы хотите уловить все детали сигналов в головном мозге, нет ничего лучше прямого контакта. Долгое время после того, как стало известно о способности нейронов вырабатывать электрические импульсы, исследователи ощущали беспомощность: они не могли найти инструмент, который позволил бы подсоединиться к одному нейрону — основной структурно-функциональной единице нервной системы.



Прорыв в данной области на этот раз был не техническим, а, как ни странно, зоологическим. В 1930-е годы британский физиолог Джон Захари Янг отметил у кальмара особый нерв. Этим морским обитателям в свое время не пришлось развивать отдельное нервное волокно, отвечающее за быструю передачу энергии; но ведь им хватает доли секунды, чтобы активировать свой так называемый реактивный двигатель и умчаться прочь! Они решили перехитрить всех и вырастили из соответствующих нейронов гигантские нервные волокна — аксоны. Толщина каждого из них достигает около 1 мм в диаметре, что позволило исследователям протолкнуть крошечный электрод внутрь волокна, а также произвести замещение внутренней жидкости аксона различными комбинациями химических веществ.

Другие британские ученые — Алан Ходжкин и Эндрю Хаксли — использовали электрод, усилитель и регистрирующее устройство, чтобы с точностью до миллисекунды (мс) установить, что же все-таки происходит внутри аксона кальмара. В промежутке между 1939 и 1952 годами с длительными перерывами на выполнение оборонных исследований им наконец удалось выяснить, что нервные импульсы передаются с помощью скачкообразных движений заряженных ионов, проходящих по мембранам. Это легло в основу современной молекулярной теории о том, как нейронные сети передают сигналы (подробнее см. в гл. 4). В 1952 году ученые опубликовали результаты своего исследования в пяти научных статьях.

Алан Ходжкин и радиоастроном Мартин Райл — лауреаты Нобелевской премии

В наши дни фиксация возбуждения отдельных нейронов возможна не только у кальмаров. Фактически ученые могут измерять электрические сигналы на крошечных мембранных фрагментах, аккуратно

всасывая их в кончик стеклянного электрода буквально на микрометр. Немецкие нейробиологи Берт Сакман и Эрвин Неер в 1970-х годах показали, что этот метод позволяет изолировать отдельные каналы клеточной мембраны, через которые проходят заряженные ионы. Также ученым удалось выяснить, как можно контролировать образующуюся разность потенциалов. Как и их британские коллеги, Сакман и Неер стали обладателями Нобелевской премии по физиологии и медицине.

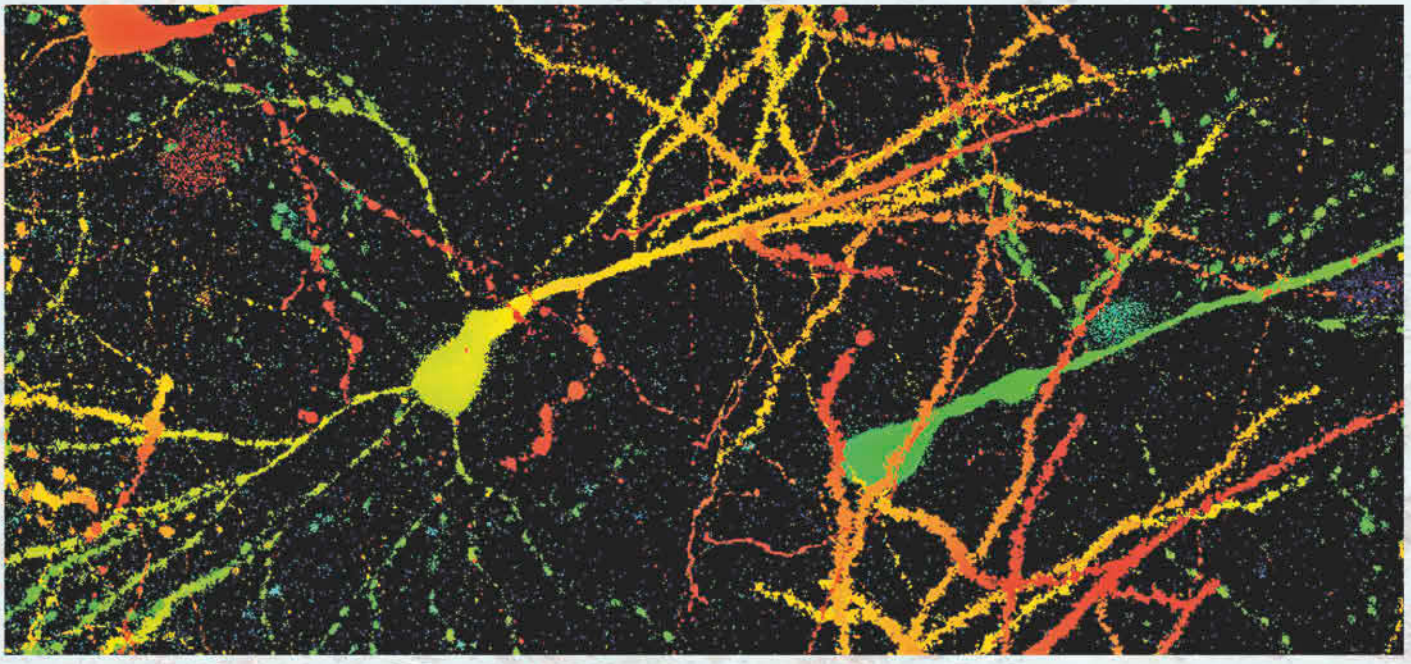
Эндрю Хаксли

Флуоресцентная метка

Строение головного мозга довольно витиевато. Новые методы визуализации и маркировки по-прежнему помогают исследователям фиксировать местоположение клеток, сетей и межклеточных контактов, а также отслеживать более масштабные взаимодействия внутри головного мозга.

Метод, позволяющий создавать одни из лучших изображений нейронов, объединяет молекулярную биологию с представлениями из области сложной физики. Двухфотонная микроскопия использует инфракрасные лазеры для освещения объекта. Способные *флуоресцировать* (светиться) молекулы при попадании на них света лазера поглощают два фотона — отсюда и название, — а после испускают один фотон

Нейроны мыши, маркированные зеленым флуоресцентным белком



Тубастрея — твердый коралл, светящийся в темноте

видимого света. Данная техника — эффективный метод для быстрого сканирования живой ткани. Для проведения исследования при помощи данного метода флуоресцентную мишень необходимо предварительно искусственно вживить в ткань. Впервые это было сделано для одиночного живого нейрона путем инъекции: химическое вещество мгновенно распределилось по всем отросткам и ветвям клетки. Как отметил исследователь Карел Свобода, нейрон засветился, «словно рождественская елка».

Титаническая работа наконец принесла плоды, когда ученые дополнили упомянутую методику генетическими манипуляциями: некоторые медузы и кораллы выделяют зеленый флуоресцентный белок, и ген этого белка можно ввести в нейроны растущей мыши с помощью вирусного вектора. Когда чужеродная молекула ДНК без ошибок работает в одном из 10 000 нейронов, клетка начинает продуцировать свои собственные флуоресцентные молекулы. Как и в случае с окрашиванием по методу Гольджи, избирательность помогает получить хорошо читаемые изображения при свечении лазера нужной частоты.

Что важно, методика абсолютно безвредна: в неповрежденном головном мозге можно снова и снова сканировать один и тот же нейрон. Это открывает перед исследователями широкие возможности: например, при использовании данной методики удается отследить даже малейшие изменения в клеточной структуре и межклеточных контактах, а это, в свою очередь, бесценная помощь в тестировании гипотез о строении памяти (подробнее см. гл. 7).

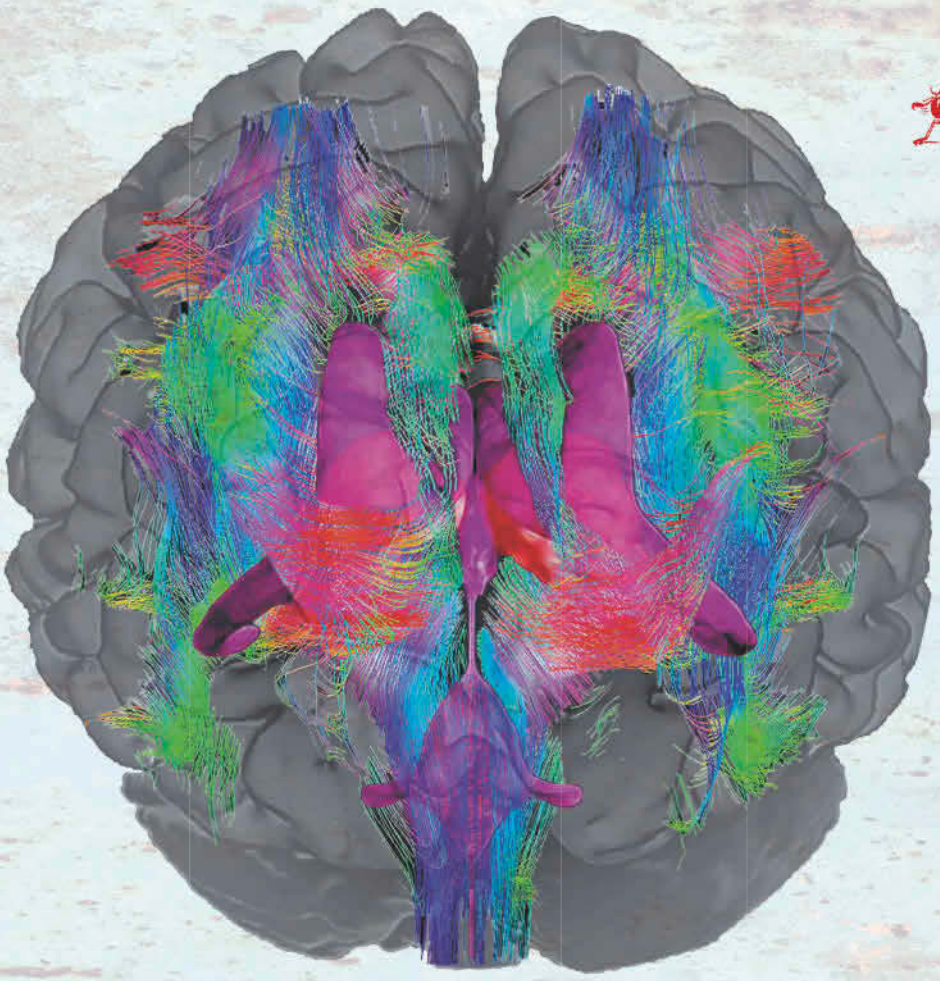
Так как флуоресцентные белки добавляют сами исследователи, нет необходимости прибегать к использованию белков естественного происхождения. Специалисты в области белковой инженерии разрабатывают синтетические флуоресцентные белки, которые сочетают с другими компонентами клетки, например для регистрации изменения уровня кальция. В результате получается нейрон, который под микроскопом способен излучать свечение в возбужденном состоянии, что позволяет визуализировать деятельность головного мозга в режиме реального времени.

Прошу любить и жаловать: коннектом!

Бесценный багаж знаний, полученный при помощи новых инструментальных средств исследования головного мозга, вдохновил нейробиологов на создание ***коннектома*** — грандиозной карты, отображающей все нейронные связи головного мозга человека. Весьма амбициозная цель, не правда ли? В сравнении с числом задействованных в ней клеток и структур проект по исследованию генома человека, определяющегося последовательностью 3 млрд пар оснований молекулы ДНК, не кажется таким уж внушительным. Но инвестиции в проект и стимул для разработки и внедрения новейших технологий будут иметь значение, даже если конечная цель далека.

Научно-исследовательский проект «Коннектом человека», действующий под руководством США, был запущен в 2009 году. Было решено использовать разновидность МРТ — *диффузионную спектральную томографию*, способную определить направление нервных волокон, — и составить схему соединений головного мозга в относительно крупном масштабе — тысячи волокон за раз.

Уже представлены некоторые результаты проекта — обновленная карта коры головного мозга, составленная на основе снимков



Диффузионная спектральная томография (разновидность МРТ) раскрывает комплексное строение белого вещества

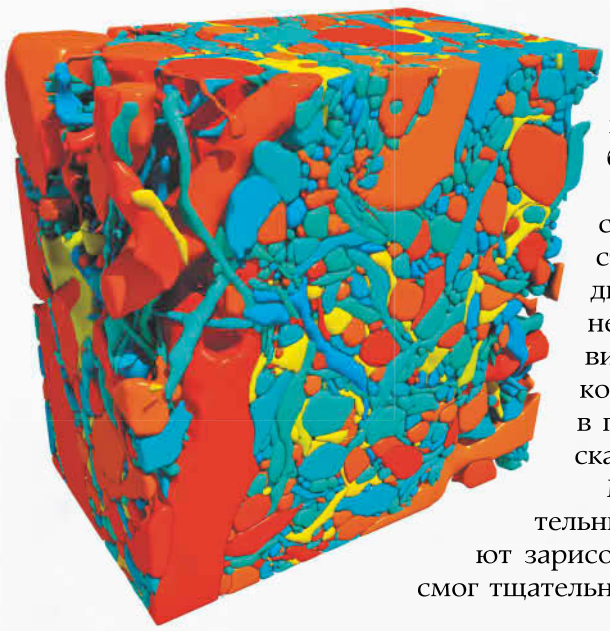
210 взрослых пациентов. Анализ потока информации проводился при помощи алгоритмов машинного обучения. На карту нанесены 180 различных областей коры головного мозга, более половины из которых были неизвестны ранее. Сколько же еще предстоит узнать о мозге?

Другие группы анализируют крошечные зоны головного мозга человека и других видов при помощи методов с более высокой степенью детализации. Так, было тщательно разработано множество методов для визуализации мозга макаки; для исследования мозга мышей применялось *двухфотонное флуоресцентное сканирование*; довольно трудоемкий процесс представлял собой анализ изображения срезов тканей дрозофилы: для картирования 60 000 клеток (1/4 нервной системы дрозофилы) потребовалось целых 10 лет, зато результаты проведенных исследований способствовали созданию трехмерной карты (3D-карты), отображающей все связи каждого нейрона.

Однажды технологии откроют перед нами возможность свободно передвигаться по виртуальному 3D-изображению головного мозга человека в любом масштабе. Но придется подождать: по предварительной оценке, для хранения информации о полном коннектоме человека потребуется 10^{21} байт (1 зеттабайт), а это практически суммарный объем всей компьютерной памяти на планете на сегодняшний день.

В тесноте, да не в обиде

Современным нейробиологам предоставлен фантастический ассортимент способов исследования мозга, таких как разного рода визуализация и картирование. Пробиваясь сквозь завесу тайны, эти методы могут создать у нас разностороннее впечатление об этом плотном желеподобном органе.

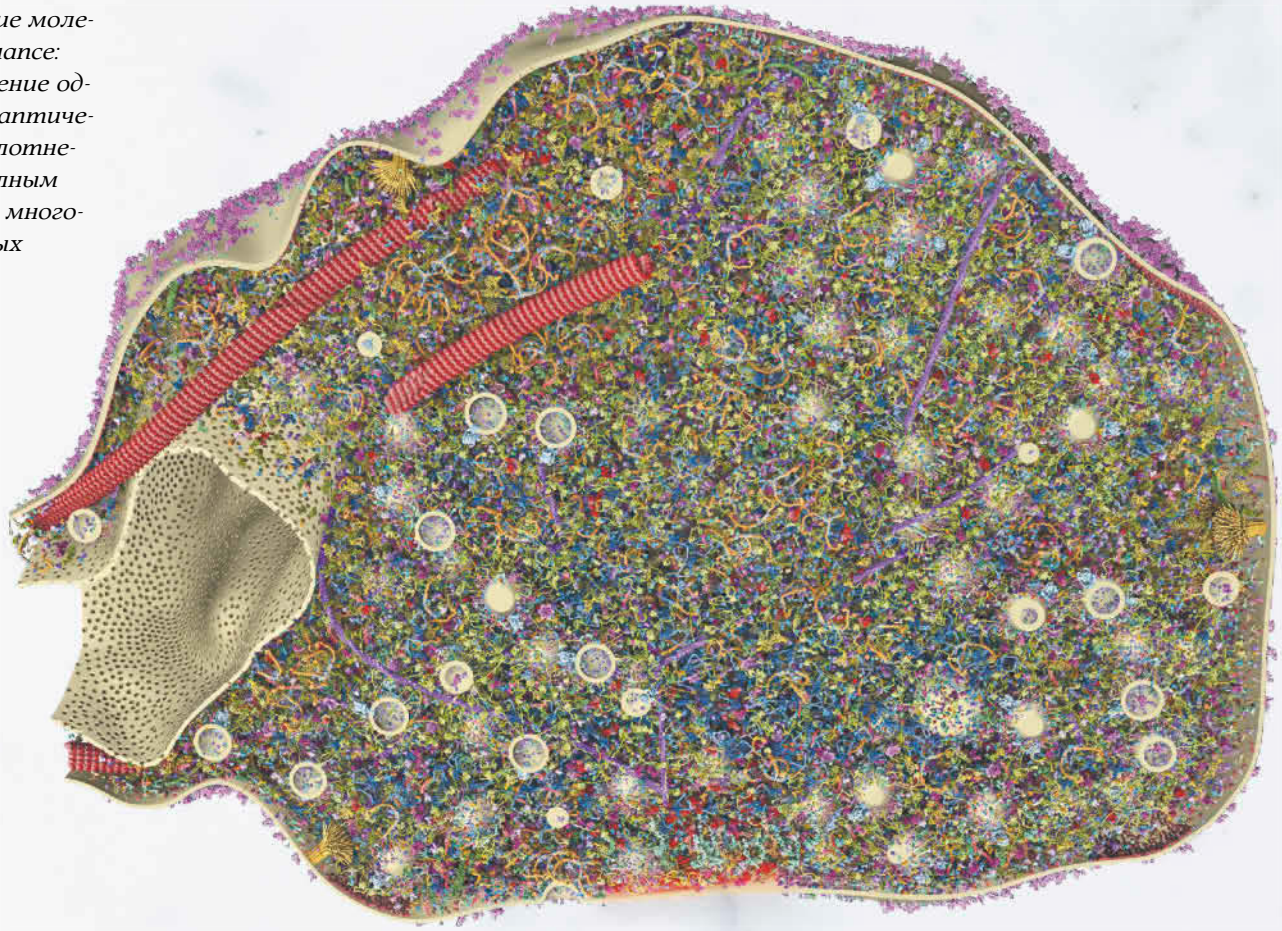


Клеточное сплетение нервных волокон в коре головного мозга: дендриты изображены в самых темных тонах, аксоны — в более светлых, ветви глиальных клеток — самые светлые

Речь пойдет не столько об изображениях, построенных при помощи МРТ-сканирования (хотя и у них есть свои ограничения), сколько о том, чего не стоит терять из виду при рассмотрении изображений клеток.

Представьте, что вас уменьшили до среднего размера молекулы белка и предоставили вам возможность побродить среди клеток головного мозга. Первое, что вы непременно почувствуете, — в мозге удивительно тесно! Внутри него все настолько плотно структурировано, насколько это в принципе возможно, что, в свою очередь, сказывается на точности изучения мозга.

Многие изображения клеток и соединительных контактов между ними соответствуют зарисовкам Сантьяго Рамона-и-Кахаля, который смог тщательно рассмотреть отдельные нейроны благо-

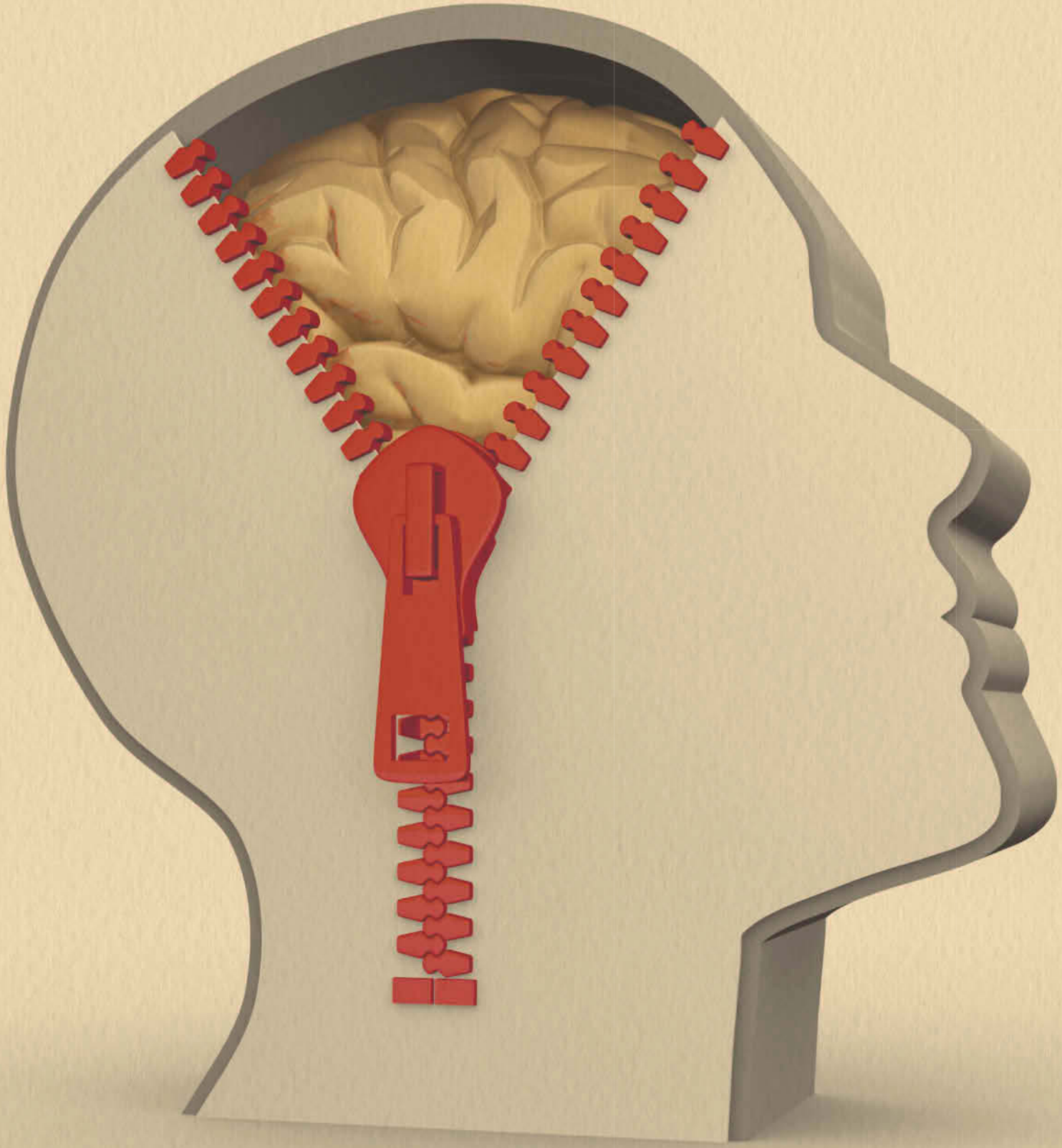


Скопление молекул в синапсе: изображение одного синаптического уплотнения с полным набором многочисленных белков

даря избирательности окрашивания по методу Гольджи. Однако сейчас создатели изображений и карт стараются учитывать все детали. Исследователи Гарвардского университета воссоздали полную картину и показали все дендриты, аксоны и ответвления глиальных клеток в коре головного мозга мыши объемом 100 куб. мкм, что сопоставимо с размером тела одного нейрона.

Картина остается не менее сложной и при малых масштабах. Замечательным тому примером является реконструкция предположительной формы синапса на основе количества всех белков вокруг и в месте соединения одного нейрона с другим, после чего выстраивается изображение каждого из них. Эта область — синаптическое уплотнение — обычно схематически изображается в форме капли, наполненной маленькими пузырьками нейромедиаторов. В увеличенном масштабе же все выглядит примерно так, как представлено на изображении выше.

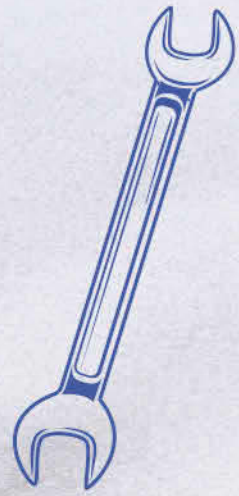
Все изображения хоть и отличаются красотой, но всегда представляют собой компромисс — для достижения большей наглядности приходится жертвовать частью деталей, однако делать это нужно осторожно, таким образом, чтобы картина оставалась целостной и отображала важнейшие характеристики реальной работы мозга.



Глава 2

ДАВАЙТЕ ПОЗНАКОМИМСЯ

Структура мозга — от анатомии до молекул



Существуют два вектора исследования мозга: сверху вниз и снизу вверх. Вне зависимости от того, каким путем вы пойдете, перед вами откроется множество структурных уровней — начиная с места переплетения разных областей головного мозга и заканчивая движением молекул внутри клетки. Нейробиология отдает предпочтение ***редукционизму*** — детальному анализу работы отдельных механизмов системы, но все же иногда любопытство берет вверх, и тогда приходится «вскакивать со скамьи», чтобы увидеть более широкую картину. В свою очередь, ***холизм*** рассматривает отдельные объекты и явления как единую систему, работающую по определенным правилам, и у этой позиции тоже есть свои сторонники.

В то же время исследование не ограничивается двумя представленными доктринами. Вы можете стремиться понять мельчайшие детали, признавая их роль во всеобъемлющей структуре. Приведем аналогию с незатихающей полемикой мира науки. Как нам следует изучать работу головного мозга и сознания: посредством исследования клеток, нейронных сетей и молекул или же посредством изучения поведения? Лучший ответ — всего понемногу.

Что же в твоей голове?

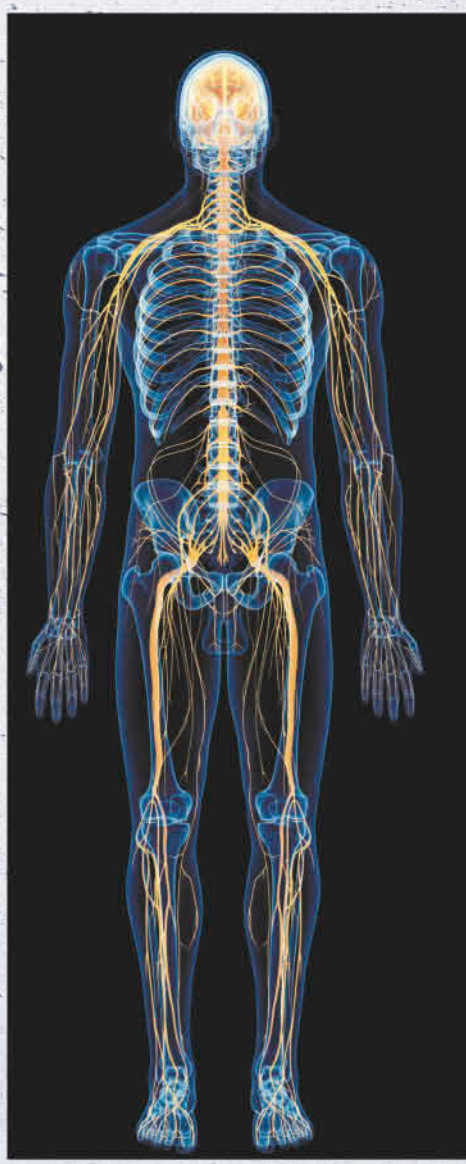
Чтобы чувствовать себя вполне уверенно, необходимо владеть базовыми знаниями о мозге на всех уровнях. Данная глава дает общее представление о более крупных структурах; о клетках и молекулах мы более подробно расскажем чуть позже.

Начнем сверху. Нервная система включает в себя мозг и нервы, проходящие по всему телу: 12 пар черепно-мозговых нервов, главным образом обслуживающие голову, присоединяются прямо к головному мозгу; 31 пара отходит от спинного мозга.

Без использования увеличительных приборов мы уже визуально можем примерно разделить мозг на три области, каждая из которых содержит заполненные жидкостью полости (*желудочки*) и мягкие клеточные ткани.

- **Задний мозг** расположен над спинным мозгом. Здесь ствол головного мозга сначала переходит в *продолговатый мозг*, контролирующий дыхание и сердцебиение, и затем прикрепляется к *мозжечку* — большому органу, отвечающему за регуляцию равновесия и координацию движений.
- **Средний мозг** — небольшой отдел головного мозга, который содержит скопления нервных клеток — *ядер* (не путать с клеточными ядрами) — и связан с такими жизненно важными функциями, как, например, регуляция циклов бодрствования.
- **Передний мозг** — самый большой отдел головного мозга. Он состоит из уже знакомой нам морщинистой коры головного мозга, которая у человека развита больше, чем у какого-либо другого биологического вида, а также из множества других элементов.

Теперь перейдем к более детальному рассмотрению.

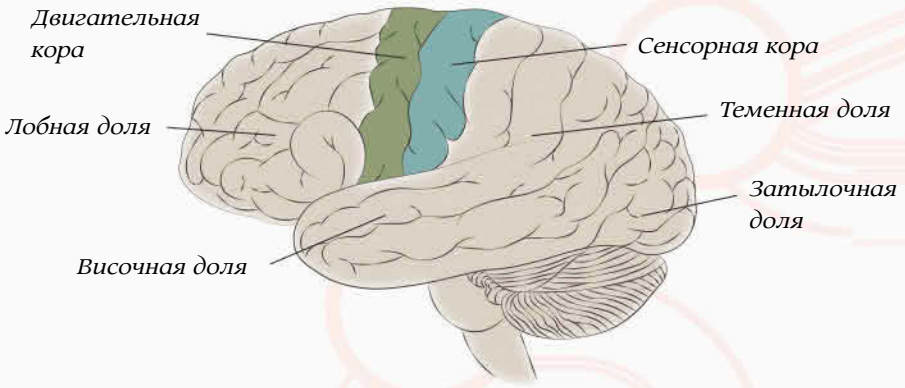


Основные пути нервной системы человека

Названия областей

Переднюю часть головного мозга образует множество структур и областей. Большинство названий этих областей неинформативны, однако некоторые могут послужить базовыми ориентирами. ***Кора головного мозга*** — тонкий слой различных по величине извилин и бороздок — покрывает поверхность двух полушарий, соединенных между собой плотным сплетением нервных волокон — мозолистым телом. ***Мозолистое тело*** — это участок ***белого вещества*** головного мозга, состоящий преимущественно из нервных волокон, чья общая длина составляет 161 000 км. Белое вещество противопоставляется ***серому***, состоящему из клеточных тел. В действительности серое вещество имеет серый цвет только в мертвом мозге, в живом же кровоток придает веществу розоватый оттенок. Несмотря на детальное изображение головного мозга, за основу принято брать разделение на лево- и правосторонние полосы, ***двигательную*** и ***сенсорную кору***, и четыре доли: ***лобную***, ***височную***, ***теменную*** и ***затылочную***.

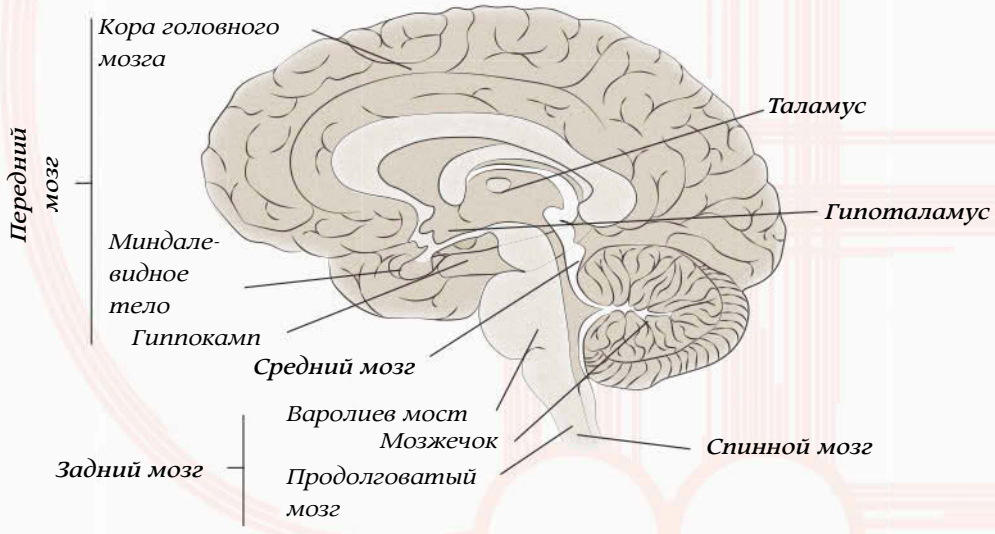
Целый ряд менее крупных ключевых структур окружает кору головного мозга. *Таламус* — масса ткани, отвечающая за интеграцию деятельности других частей мозга. Прямо под таламусом находится



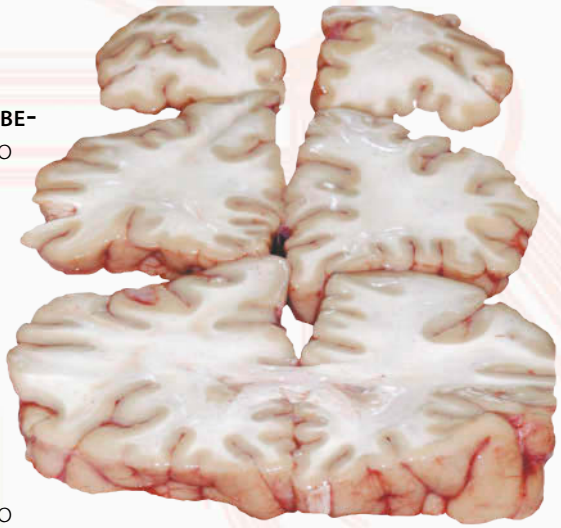
гипоталамус — отдел размером с горошину, который отвечает за выделение гормонов и регулирует голод, жажду, температуру тела и половое поведение. *Гиппокамп* — часть головного мозга, ответственная за хранение, систематизацию и извлечение воспоминаний. К гиппокампу примыкает *миндалевидное тело (миндалина)*, функции которого связаны с эмоциями и поддержанием эмоциональной окраски воспоминаний: гневом, страхом, завистью и грустью.

Вскрытие позволяет рассмотреть все перечисленные зоны, кроме двигательной и сенсорной, поскольку внешне они ничем не отличаются от основной массы коры и поддаются обнаружению только при помощи электрического возбуждения головного мозга. Однако все зоны содержат большое количество нейронов и еще большее число связей. Присваивание названий областям и приписывание им выполнение определенных функций предполагают, что мозг имеет отдельные отсеки для выполнения различных функций. Отчасти это так, но при этом каждая часть этой системы имеет сложные взаимосвязи и работает согласованно, а иногда и несогласованно с остальными частями, что и дает в итоге общую картину.

Зачастую некоторые зоны оказываются повреждены или имеют врожденные дефекты, что затрудняет определение их функций. Например, одна женщина только благодаря МРТ узнала, что родилась без мозжечка. Она отличалась слегка невнятной речью и необычной походкой, однако она была замужем и родила ребенка. Впервые МРТ она прошла в 24 года на предмет избытка цереброспинальной жидкости.



Местонахождение разума

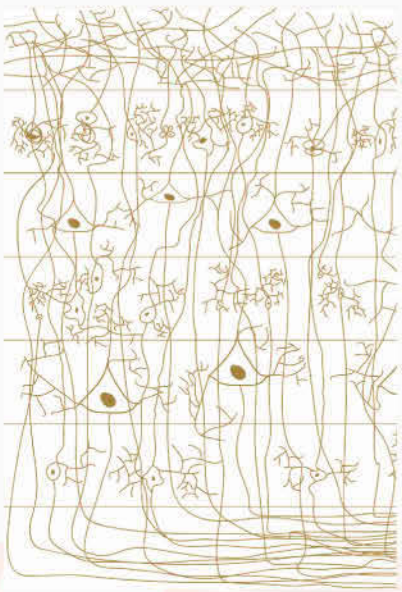


Приоткрытая кора головного мозга

Откровенно говоря, кора головного мозга человека имеет большой объем, но ее размеры легко переоценить, глядя на мозг целиком. Кора — это всего лишь тонкий наружный слой серого (а точнее розового) вещества, покрывающий мозг, и толщина этого слоя не превышает 5 мм. Преимущественно кора простирается только в одном измерении. Если разгладить морщинистый кортикальный слой, обтягивающий мозг, нашему взору откроется полотно из клеток площадью примерно 2 кв. м. Несмотря на малую толщину слоя, нередко его вес достигает более килограмма. Интересно, что кора головного мозга в среднем составляет 80% от массы мозга, но содержит лишь 20% от общего числа его нейронов.

Составляющие морщинистую кору изгибы и впадины носят свои названия — *извилины* и *борозды* соответственно. Насколько нам известно, они не наделены особо важными функциями, однако именно благодаря их наличию суммарная площадь коры составляет гораздо больше, чем может показаться на первый взгляд.

В малом масштабе основная единица коры головного мозга (*модуль*) обладает цилиндрической формой, диаметр которой составляет около 0,5 мм. В модуле присутствует около 10 000 нейронов и более 1 млн синаптических связей. В основной части коры (известной как *неокортекс*) цилиндры представляют собой шестислойные колонки из клеток, различающиеся по типу, размеру и плотности нейронов. Некоторые слои обеспечивают сообщение между полушариями и различными областями в пределах каждого



Слой полиморфных клеток

«Морщинистая» поверхность головного мозга позволяет увеличить размер его коры

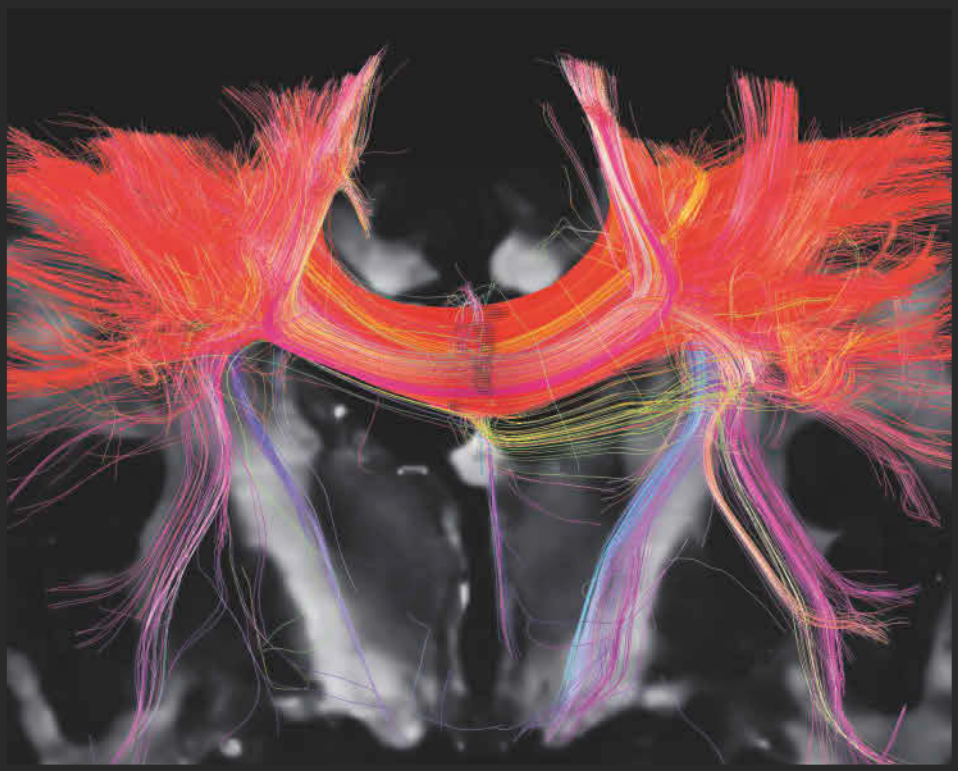
полушария, а некоторые выступают в роли «проводника» в другие области мозга.

Территория исследования данной области настолько обширна, что первые попытки ее изобразить зачастую приводили к созданию совершенно новой схемы коры. Первую достойную карту коры головного мозга удалось создать немецкому ученому Корбиниану Бродману, и произошло это в начале прошлого столетия при помощи микроскопа. Эта карта была составлена на основе анализа величины, форм и расположения клеток. 40 пронумерованных полей Бродмана иногда используют и по сей день (кортикальные слои также пронумерованы римскими цифрами). На сегодняшний день идентифицировано гораздо больше областей, и несложно заметить, что кора головного мозга так или иначе задействована в любой активности головного мозга. Помимо областей, ответственных за выполнение *когнитивных* (*познавательных*) *функций*, в коре головного мозга присутствуют области, отвечающие за зрение, слух, регуляцию движений, осязание, обоняние и вкус. И как учит нас упомянутый выше случай Финеаса Гейджа, участки орбитофронтальной и медиальной префронтальной коры которого были повреждены в результате тяжелой травмы лобной доли, кора также формирует особенности личности и поведения.

Один мозг — два полушария

Практически все структуры нашего мозга являются парными, а кора головного мозга состоит из двух симметричных полушарий, между которыми можно увидеть зазор. Плотное сплетение нервов, расположенное в этом зазоре, порождает сотни тысяч связей между полушариями. Такая двухсторонняя структура соответствует общему плану строения тела многих организмов и является настолько фундаментальной характеристикой нашего мира, что хочется думать, будто именно в ней источник нашего стремления видеть те или иные явления и вещи как пары противоположностей (светлый — темный, хороший — плохой и многие другие). Именно она предопределила многие любопытные особенности нашей нейроанатомии.

В процессе распределения мозгом важных задач есть своя изюминка; так, двигательная кора левого полушария контролирует движения правой стороны тела, и наоборот. Зрительная же кора каждого полушария разделяет обязанности особенно искусно! Область зрительной коры правого полушария распознает не те сигналы,



Оба полушария головного мозга плотно связаны между собой нервными волокнами мозолистого тела (снимок, полученный с помощью диффузионно-тензорной МРТ)

которые поступают с глаза, расположенного на противоположной стороне, а те, что были переданы с левой стороны поля зрения каждого глаза.

Некоторые другие функции преимущественно сосредотачиваются на одной стороне головного мозга. 90% людей на планете — правши, и им легче управлять тонкой моторикой своих пальцев левым полушарием. Аналогично центр Брока и область Вернике, связанные с использованием языка, чаще всего находятся в левой части коры головного мозга, правда, иногда у некоторых левшей эти области развиваются в правом полушарии.

Столь явное разделение функций послужило причиной для проведения целого ряда исследований на предмет изучения различий между двумя полушариями коры головного мозга. Результаты работ таят в себе много загадок. Некоторые исследователи имели дело с людьми, оказавшимися в безвыходном положении — перенесшими ампутацию здоровой ноги из-за ощущения ее чужеродности, — причем большинство из них жаждали поскорее избавиться от своей левой ноги. Не каждому знакомо подобное состояние, не правда ли? Как показало МРТ-сканирование, в правом полушарии коры головного мозга таких пациентов были выявлены заметные изменения.

Но пока нам так и не удалось установить хоть какую-то взаимосвязь между ощущением конечности, желанием избавиться от нее и описанными результатами исследования.

Разделенный мозг

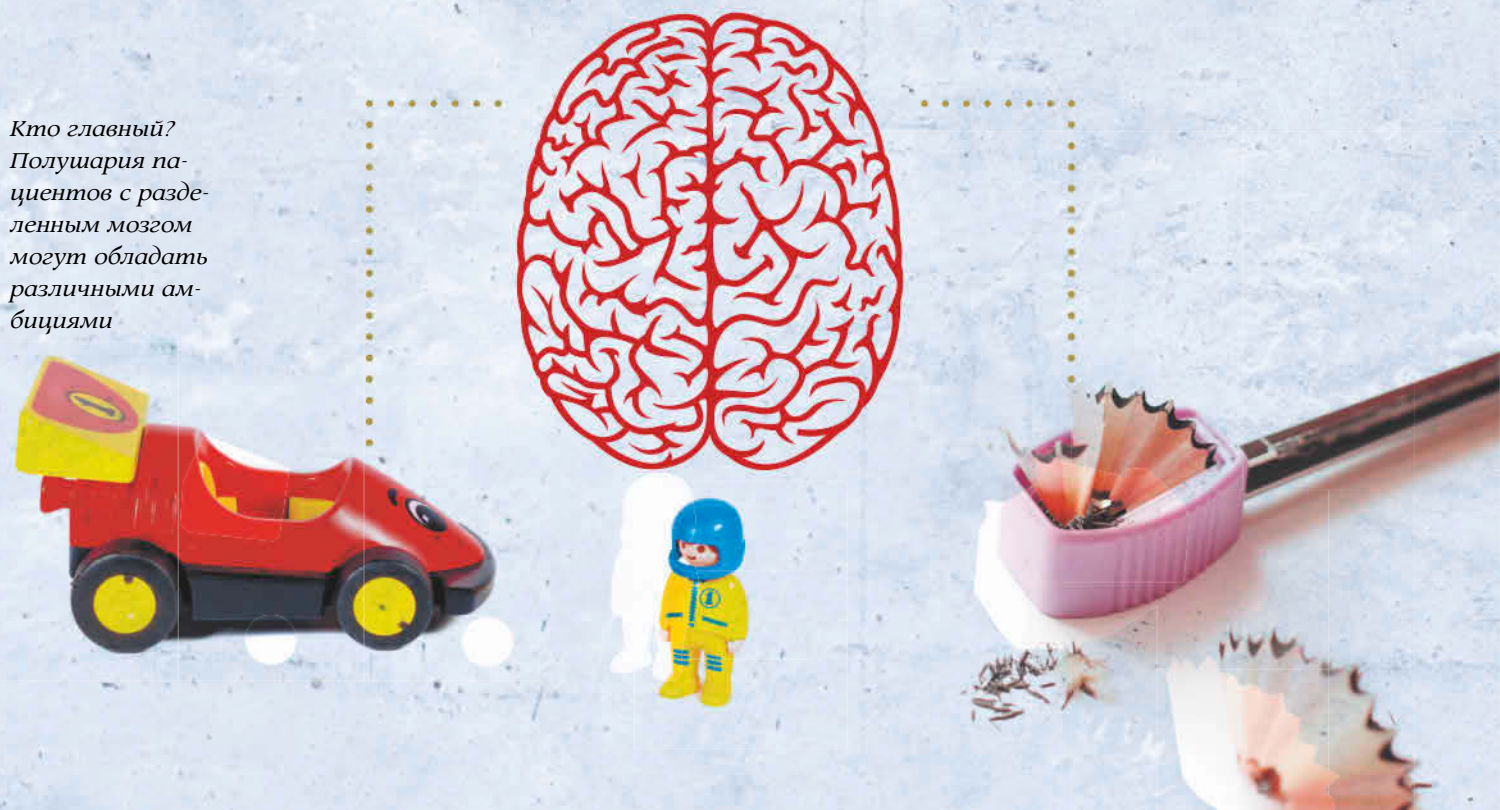
Роджер Сперри

Люди каким-то чудом умудряются прожить полноценную жизнь, даже потеряв поразительно важные части мозга.

Так, в отчаянной попытке предотвратить у людей с тяжелой формой эпилепсии усиление припадков, возникающих при переходе нервного возбуждения из одной области мозга в другую, хирурги вынуждены идти на крайние меры: они рассекают главный канал связи между двумя полушариями. Эта методика также способствует появлению занимательного материала для дальнейшего изучения. После операции пациенты не чувствуют никаких изменений и ведут себя как обычно в повседневной жизни.

В начале 1960-х годов американский нейропсихолог Роджер Сперри продемонстрировал, что в некоторых аспектах разделенный мозг функционирует не как единое целое, а как две автономные системы. Наблюдения за одним из пациентов привели его к следующему умозаключению: «В непринужденной обстановке за чашечкой чая и сигарой едва ли можно заподозрить что-то неладное».

Сперри и его студент Майкл Газзанига разработали ряд экспериментов, в ходе которых каждое полушарие получало различные стимулы. Например, они помещали некий объект в одной стороне поля зрения на столь короткое время, что пациент не успевал сдвинуть глаза, чтобы объект был увиден другим полушарием. Эксперимент показал, что левое полушарие пациента отвечает за вербальные операции и речь: человек не мог прочитать текст, находящийся только в левом поле зрения (и, соответственно, воспринимаемый правым полушарием), писать левой рукой, производить действия левой рукой или ногой в ответ на устные команды, зато он *мог*



Кто главный? Полушария пациентов с разделенным мозгом могут обладать различными амбициями

с закрытыми глазами определять предметы, касаясь их левой рукой, и называть их.

Независимость полушарий головного мозга становилась еще более наглядной, когда их действия принимали противоположно направленный характер. Так, по словам Сперри, когда тот же пациент задействовал в работе обе руки, «временами его левая рука сбивалась с курса и начинала выполнять отстраненную и даже противоположную цели деятельность, что вызывало проблемы».

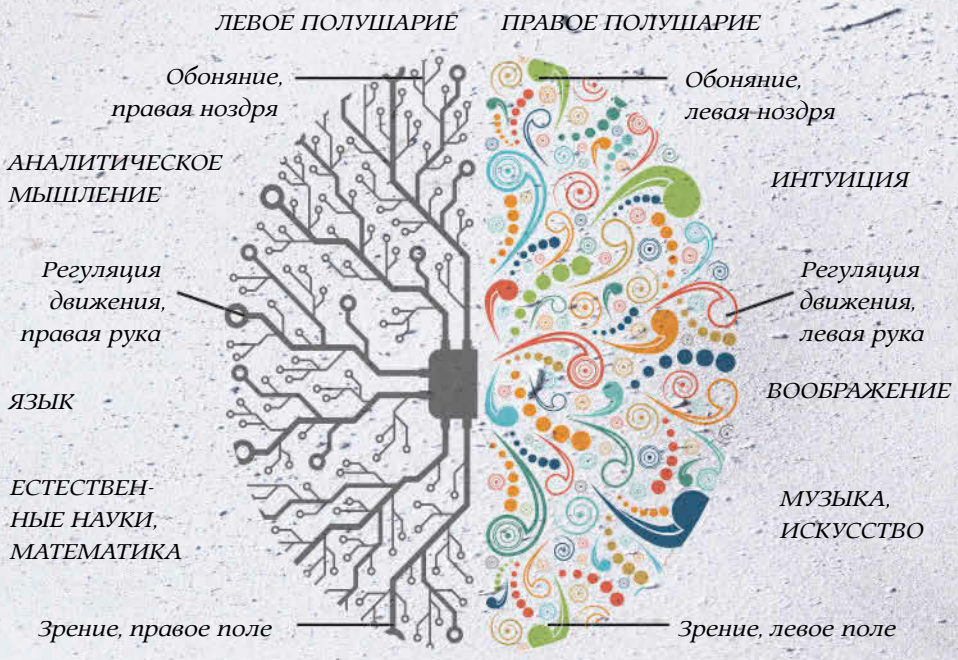
К сожалению, наблюдения за другими пациентами привели к обнаружению и более драматичных конфликтов. Так, ребенок, за языковые способности которого отвечали обе стороны мозга (в нейробиологии на все есть свои исключения), отвечал по-разному, когда вопросы поочередно воспринимались правым и левым полушариями. На вопрос «Кем ты хочешь стать, когда вырастешь?» одно полушарие отвечало «гонщиком», а другое — «проектировщиком». Устойчивое выражение «быть на распутье» как нельзя лучше описывает подобные случаи.

За пределами

Глубокая расщелина между двумя полушариями производит на людей столь сильное впечатление, что в свое время это даже спровоцировало возникновение мифа о так называемых левополушарных и правополушарных людях. Он зиждется на известном факте о границе между полушариями мозга, любопытных результатах исследований вроде тех, что были выведены Роджером Сперри, грубых гипотезах о церебральной локализации и предположении о наличии у каждого человека доминантного полушария.

Основная идея заключается в следующем: у одних людей лучше развиты вычислительные навыки, способность к логическим рассуждениям и языковые способности (такие люди считаются левополушарны-

Утверждение, что аналитические и творческие навыки лежат в разных полушариях, является серьезным упрощением



Наглядная иллюстрация гипотезы о доминировании правого или левого полушария (не стоит слепо доверять словам, выделенным заглавными буквами)

ми), другие люди не настолько организованы и им гораздо в меньшей степени свойственен логический способ мышления, но при этом они более креативны и артистичны (это правополушарные люди). Такая незатейливая дихотомия должна настораживать тех, кто более или менее знаком с наукой о мозге, но, как известно, простота привлекает, поэтому идея прижилась.

В действительности данная концепция лишена основательности, и на то есть несколько причин. Маловероятно, что какие-либо способности индивида сосредоточены лишь в одном полушарии. Конечно, сложные когнитивные функции могут быть тесно связаны с определенными зонами, такими как центр Брока, но они также задействуют и другие области мозга. У людей с неповрежденным реле между полушариями обе стороны непрерывно взаимодействуют друг с другом и совместная деятельность различных областей помогает сформировать должную реакцию при любой ситуации.

Допустим, но тогда возникает другой вопрос: могут ли механизмы одного из полушарий доминировать над этим динамичным сотрудничеством? И снова маловероятно.

Чтобы как следует во всем разобраться, команда ученых из Университета штата Юта прибегла к МРТ-сканированию: воспользовавшись нейронаучной базой данных, они занялись изучением снимков мозга 1011 людей и измерили плотность серого вещества, содержавшегося в тысяче различных областей каждого полушария. По результатам анализа было установлено, что за работу отдельных функций (например, за обработку языковой информации) отвечают нейронные сети, расположенные в одном полушарии. Но они так и не нашли доказательств того, что одна сторона мозга более влиятельна по отношению к другой в целом.

В дополнение к этому ученые оспорили распространенное представление о том, что якобы доминантное полушарие соотносится с предполагаемыми различиями между мужчинами и женщинами. Согласно результатам исследования, в выборке отсутствовали значимые половые различия.

Разумеется, это вовсе не означает, что люди не различаются по характеру или стилю мышления, описанными в левополушарной/правополушарной гипотезе. Просто эти различия не обусловлены тем, что одно из полушарий доминирует над другим.

А сколько нейронов видишь ты?

Каждая наука оперирует своими численными постоянными, на которые мы можем ориентироваться: скорость света в вакууме, заряд электронов и т. д. В нейробиологии их не так уж и много. Возьмем, например, число нейронов мозга взрослого человека. На протяжении многих лет буквально в каждой статье о мозге упоминалось, что в мозге среднестатистического человека содержится 100 млрд нейронов. Кажется, никто не может с уверенностью сказать, откуда возникло такое круглое число, которое, к слову, соответствует приблизительному количеству звезд в нашей Галактике — Млечном Пути, — что, несомненно, добавляет шарма.

Представьте себе вычисления чего-то очень значительного: без взятия образца и умножения здесь определенно не обойтись. Несколько лет назад был проведен эксперимент с полным разрушением ткани головного мозга нескольких мужчин средних лет и подсчетом в получившейся смеси количества окрашенных клеточных ядер. Данный метод позволил ученым обойти стороной сложности с отображением нейронов и варьирующейся плотностью клеток в разных частях мозга. В соответствии с результатами данного исследования широко цитируемый круглый показатель снизился со 100 млрд нейронов до 86 млрд. Полученное число считается более точным, но это всего лишь наилучшая возможная оценка на данный момент.

Аналогичная осторожность распространяется и на другие подсчеты. Число прочих клеток (различного рода глиальных клеток — главной мишени вышеупомянутой научной работы) в настоящее время приблизительно приравнивают к количеству нейронов. А каково же число соединений? Что ж, некоторые нейроны действительно образу-

ют до 10 000 синапсов, так что при желании соответствующие расчеты можно произвести самостоятельно.

Мое любимое число, касающееся мозга, представляет собой результат трудоемких вычислений из одного широко используемого учебника. Мозг при этом рассматривается как некая запутанная сеть из мембран нейронов. Площадь поверхности одного среднестатистического нейрона составляет 250 000 кв. мкм. Общая площадь поверхности 85 млрд нейронов достигает 21 250 кв. м — это примерно три футбольных поля.

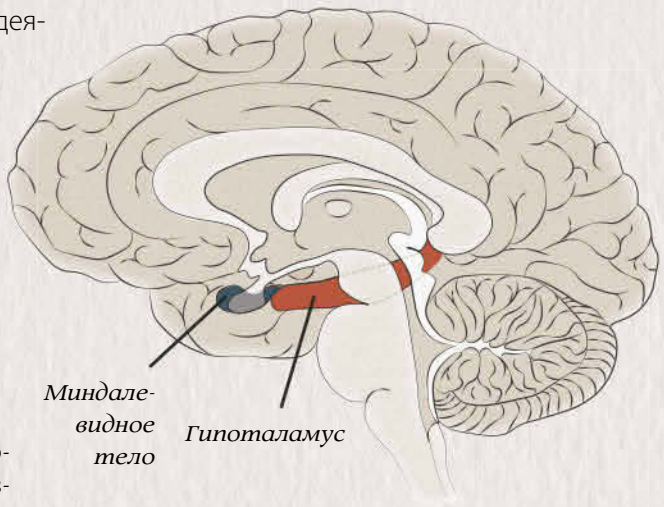
Наука нуждается в числовых данных, однако следует учитывать, что расчеты в клеточном мире даже при наилучшем раскладе остаются лишь приблизительными. Какой же в этом плюс, спросите вы? Что ж, если вы считаете, что блистательно владеете математическими навыками и вдумчиво выполняете вычисления, то у вас все еще есть шанс внести ценный вклад в нейробиологию.

Мал, да удал

Кора головного мозга, несомненно, впечатляет своими размерами и многогранностью. Но не менее важны и более древние, маленькие части головного мозга, такие как ***миндалевидное тело*** и ***гипоталамус***: даже в таких крошечных областях содержится множество отделов, или ***ядер***. Оба они неразрывно связаны с остальными частями мозга и участвуют в регуляции его деятельности — как сознательной, так и бессознательной.

Миндалевидное тело

Миндалевидное тело отвечает за эмоции. Информация от органов чувств первым делом поступает к миндалевидному телу и провоцирует мгновенную эмоциональную реакцию (например, на угрожающее выражение лица). Последующее поведение может претерпевать изменения в ходе дальнейшего анализа в коре головного мозга, но только после бессоз-



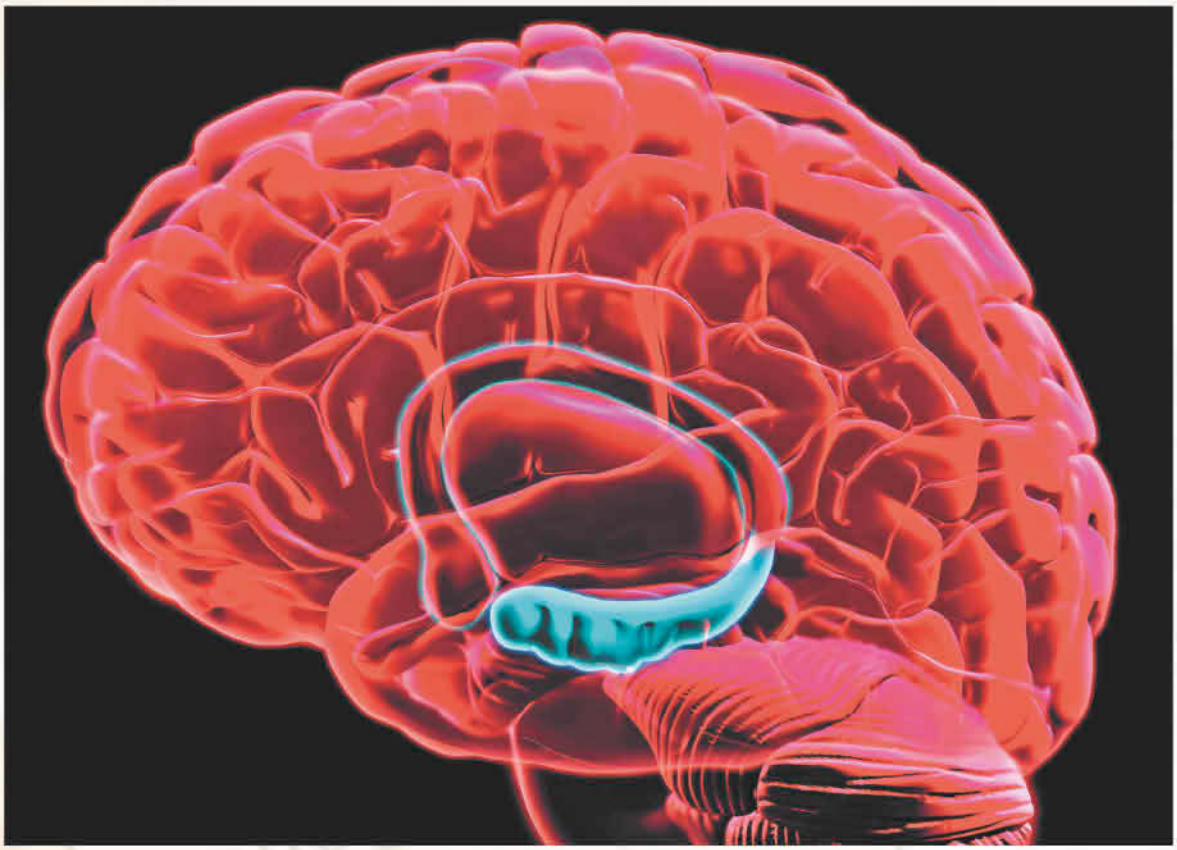
нательной, рефлекторной реакции, исходящей из этого уголка мозга. Различные части миндалевидного тела связаны с агрессией и тревожностью, кроме того, это вместилище страхов, как врожденных (например, боязнь змей), так и приобретенных в результате научения, особенно в отношении произошедших в прошлом событий, причинивших физическую боль.

Гипоталамус

Гипоталамус весит всего несколько граммов, но он тоже связан с такими чувствами, как гнев и агрессия, а также регулирует естественные потребности и аппетит, имеет особую связь с вегетативной нервной системой, функционирующей без сознательного контроля, и руководит реакциями по типу «бей или беги», являющимися ответом организма на воспринимаемую опасность. При этом наблюдаются учащенное сердцебиение, расширение кровеносных сосудов и мурашки. Гипоталамус влияет на продуцирование гормонов с каскадными эффектами и в свою очередь сам откликается на гормональные сигналы.

Гипоталамус и миндалевидное тело до сих пор являются сложными объектами для изучения, участвуя в великом многообразии ключевых жизненных аспектов, включая социальное поведение. С точки зрения эволюции это довольно давно сформировавшиеся области мозга, но это не означает, что они участвуют только в базовых функциях. Исследователь из Нью-Йоркского университета и по совместительству лидер, возможно, единственной нейронаучной рок-группы «Амигдалоиды» Джозеф Э. Леду настаивает на том, что в сложных процессах (например, в принятии решений) участвуют как эмоциональные центры, так и области, обрабатывающие информацию.

От некоторых звуков по позвоночнику проходит дрожь, вызываемая миндалевидным телом



Как и многие другие области мозга, расположенный под височными долями гиппокамп обладает парной структурой

Гиппокамп

Нам немногое известно о феномене памяти, но мы вполне уверены в том, что за ее формирование отвечает ***гиппокамп***. Фрагменты памяти не хранятся внутри этой крохотной области (подробнее см. гл. 7); это своего рода центр анализа и синтеза, который оформляет опыт в воспоминания. Затем гиппокамп по крупинкам восстанавливает накопленные воспоминания из совершенно разных частей мозга. Поиск информации может производиться сознательно, например, когда что-то вызывает у вас дразнящее чувство «верчения на языке» и вы копаетесь в воспоминаниях в поисках ответа, но никак не можете его найти.

В результате обширных исследований мозга с полным или частичным отсутствием гиппокампа удалось выявить его прямое участие в процессе формирования новых воспоминаний, причем как у людей, так и у животных. В то же время наличие гиппокампа — одно из важнейших доказательств адаптивности нашего мозга. Область современной нейробиологии, изучающая пластичность нашего мозга, охватывает диапазон от изменений в мелких связях до довольно ощутимых нейроанатомических нарушений.

В наиболее часто цитируемом в этой области научном исследовании было использовано сканирование мозга для измерения гиппокампа у лондонских таксистов, которым регулярно приходится иметь дело с запутанной транспортной сетью города. Для получения лицензии на вождение одного из черных лондонских кебов потенциальные

водители должны выучить 25 000 извилистых городских улиц и их пересечений, чтобы суметь мгновенно построить 320 маршрутов. Для развития такой «сверхспособности» требуется четыре года. Ученые обнаружили у таксистов следующую анатомическую особенность: у них расширена одна область гиппокампа за счет сужения другой.

«Куда едем, шеф?» Водители лондонских такси держат в голове карту улиц необычайно сложного города

Казалось бы, водители автобусов тоже изо дня в день испытывают на работе не меньший уровень стресса и напряжения. Однако данное сканирование не выявило в строении их мозга аналогичных изменений, поскольку, в отличие от такси, автобусы следуют лишь по нескольким заданным маршрутам. Это говорит о том, что гиппокамп участвует в обучении *пространственной навигации*, которая, по всей видимости, является своеобразным древним навыком выживания, обретшим современное обличие, так необходимое таксистам. Более поздние исследования с участием лондонских жителей, передвигающихся по навигатору или без его использования, позволили ученым предположить, что разные субрегионы одной и той же анатомической единицы могут быть вовлечены в процесс запоминания пространственных деталей и планирования маршрутов.

Разумеется, это далеко не единственная функция гиппокампа. Наблюдения за еще одной группой лиц — музыкантами — в ходе МРТ-сканирования позволили обнаружить новое доказательство изменений гиппокампа.

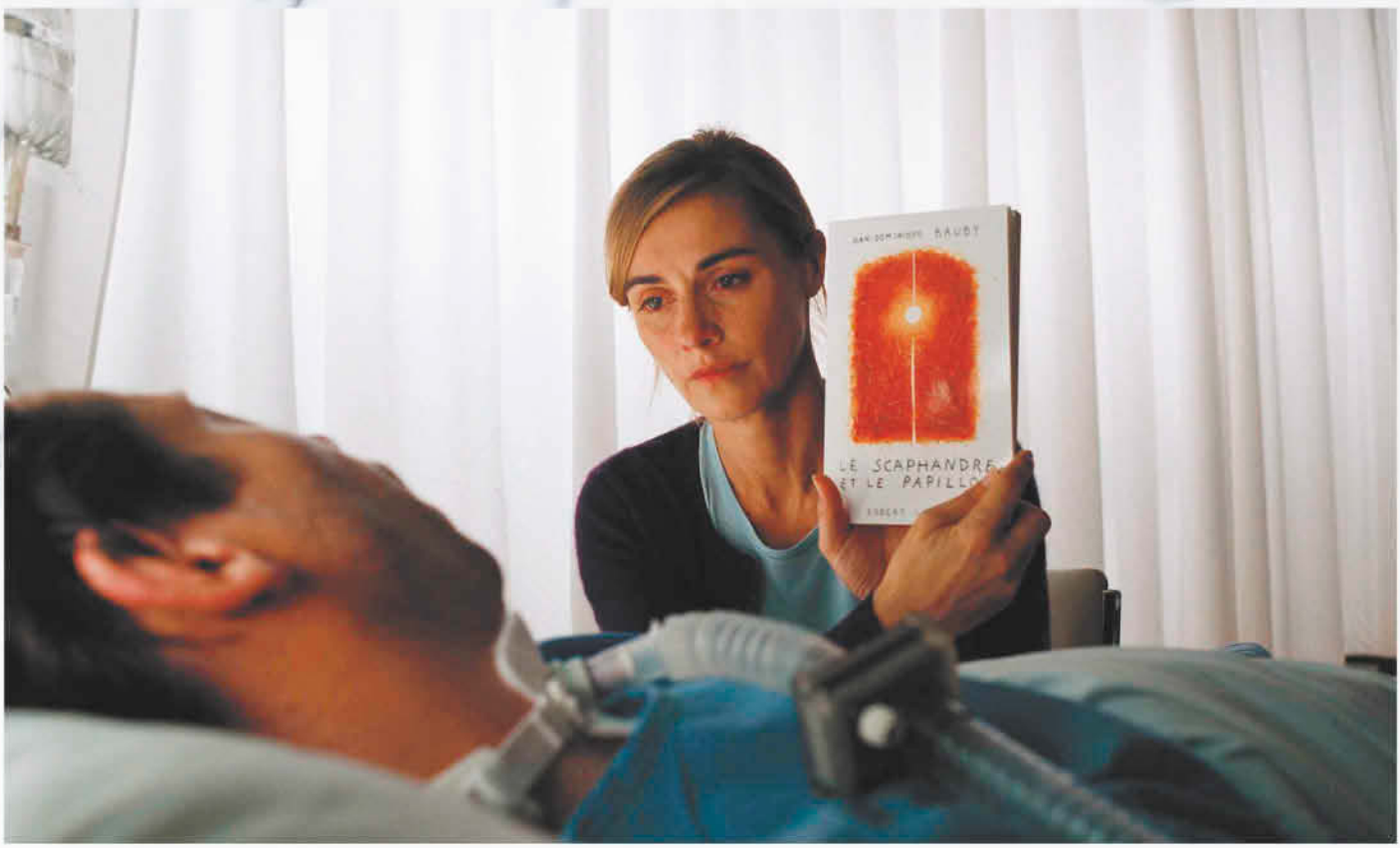
Еще немного

Завершает основной перечень легко обнаруживаемых участков мозга область под названием *таламус*, которая располагается примерно в центре нашего мозга. Ниже таламуса находится ***ствол головного мозга***, а за ним — ***мозжечок***; вместе они обеспечивают целый ряд базисных функций, большинство из которых осуществляется на бессознательном уровне.

Мозжечок

Неспроста значение слова можно интерпретировать как «*малый мозг*», ведь мозжечок своим видом действительно напоминает уменьшенную копию самого мозга, вплоть до его многоуровневой структуры. Мозжечок отвечает за координацию движений, балансирование и поддержание положения тела — функции, о которых мы зачастую вспоминаем только в случае их нарушения. Как и остальные части мозга, мозжечок и кора головного мозга связаны между собой многочисленными нервными соединениями, посредством которых ведут оживленный «диалог». И хотя вес мозжечка составляет лишь 10% от массы всего мозга, на его долю приходится половина от общего числа клеток мозга и не менее 80% всех нейронов.

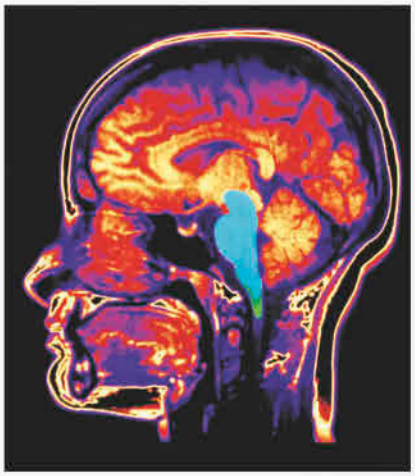
Мозжечок



Жану-Доминику Боби показывают его книгу. Кадр из фильма «Скафандр и бабочка» (2007)

Продолговатый мозг и варолиев мост

Эти главные компоненты ствола головного мозга обладают сложным строением и представляют собой сплетения нервов, связывающих между собой спинной мозг и мозжечок. Их легко представить как подчиненных высшим функциям, но они также лежат в основе всего остального. В это трудно поверить, но некоторые жизненно важные функции могут сохраниться даже при отсутствии коры головного мозга или некоторых других его частей. Зафиксировано несколько феноменальных случаев роста и развития человека вообще без мозжечка. При этом серьезные повреждения ствола головного мозга, как правило, приводят к неминуемой смерти.



Ствол находится в самом центре головного мозга и по сути является продолжением спинного мозга

СИНДРОМ ЗАПЕРТОГО ЧЕЛОВЕКА

В 1995 году у французского журналиста Жана-Доминика Боби произошел инсульт, после которого он несколько недель провел в коме. В своих мемуарах «Скафандр и бабочка» (1997) журналист поведал, что спустя три недели после инсульта он пришел в сознание, но обнаружил, что не может контролировать практически все мышцы тела. Повреждение ствола головного мозга вызвало полный паралич при полном сохранении сознания — этот медицинский случай в 1960-х годах получил название «синдром запертого человека».

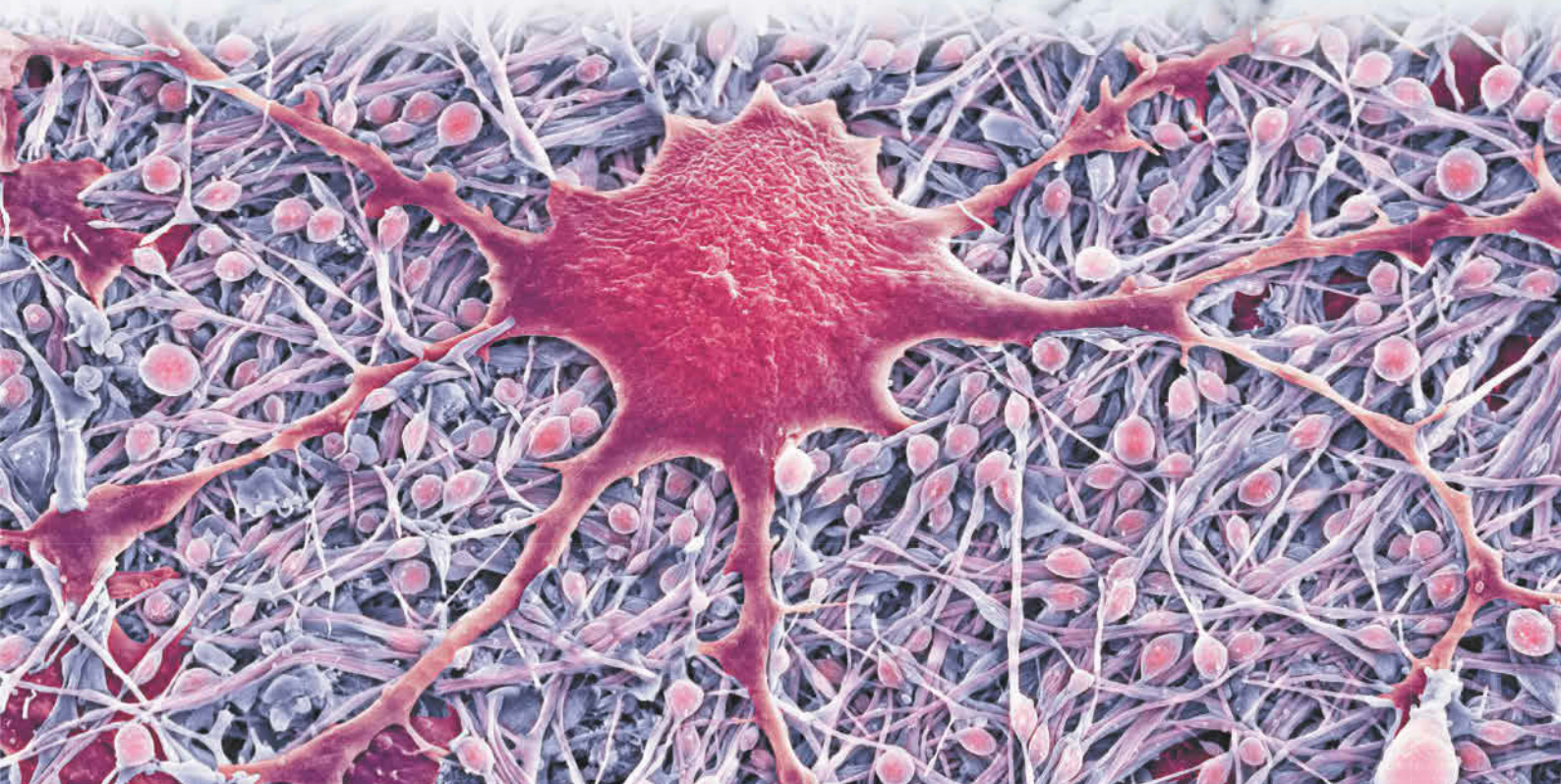
Как и некоторые его братья по несчастью, Боби мог лишь моргать одним глазом. В дальнейшем он научился общаться при помощи этой своей единственной сохранившейся двигательной способности: медсестра медленно читала алфавит, а журналист моргал на нужной букве. Удивительно, но таким образом за 10 месяцев он сумел «написать» целую книгу при помощи примерно 200 000 морганий! К сожалению, спустя несколько дней после ее публикации Боби умер от пневмонии.

Из каких клеток мы состоим?

Если отделить мозг человека от черепа и положить его на лабораторный стол, то через пару мгновений можно будет увидеть, как он растечется по столу — меньше, чем шарик с водой, но больше, чем кусочек теста. Это происходит, поскольку у мозга недостаточно внутренних опор для того, чтобы поддерживать форму. Как мы увидели, мозг состоит из множества крупных структур, но в то же время это масса клеток, защищенная кожей, костями и мембранами и специализирующаяся на ментальной деятельности, а не физической.

Замкнутая система кровеносных сосудов охватывает каждый 1 куб. мм коры головного мозга. Сосуды в головном мозге выполняют ту же функцию, что и в остальном организме, чего не скажешь о его ткани. Последняя обладает уникальным набором клеток, среди которых выделяют два основных типа.

- **Нейроны**. Эти клетки на протяжении целого века оставались главной темой для обсуждений как среди профессионалов, так и среди обывателей. Окрашивание по методу Гольджи значительно облегчило процесс изучения нейронов и способствовало открытию их особенностей, так отличающих их от других клеток.
- **Глиальные клетки**. Этому типу клеток ученые долгое время ошибочно отводили лишь вспомогательную роль. Так, *олигодендроциты* образуют жироподобную миелиновую оболочку вокруг нейронов, способствуя быстрой передаче сигналов, а *микроглия* выступает в роли собственной иммунной системы мозга. Однако *астроциты* — третий тип глиальных клеток — занимают 50% от общего объема мозга и играют гораздо более важную роль



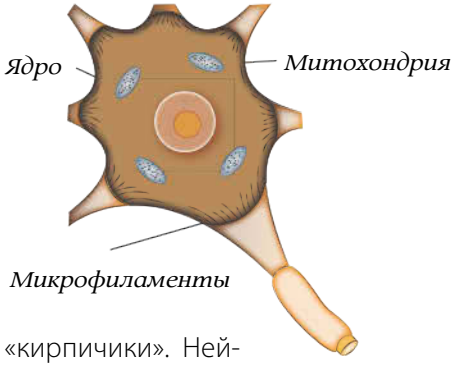
Одиночная глиальная клетка под электронным микроскопом

Мозг представлен множеством разных типов клеток

в его деятельности, нежели просто пассивные наблюдатели. Как это часто случается в биологии, за неимением информации поначалу эти клетки не вызывали у ученых должного интереса, но современные исследователи признали астроциты (по крайней мере, некоторые из них) схожими по функционалу с нейронами. Некоторые из этих клеток способны реагировать на активность локальных нейронов и изменять или модулировать передачу нервного сигнала путем высвобождения своих собственных нейротрансмиттеров.

Ученым предстоит еще многое узнать об этих скромных клетках и их роли в деятельности нашей нервной системы. Это справедливо и для других компонентов мозга. Первоначальная незаинтересованность в том или ином объекте изучения может быть связана с несовершенством использованной методики, но вовсе не означает абсолютное отсутствие у этого объекта важных функций. Если клетки расположены достаточно близко для взаимодействия путем передачи химических сигналов или нервных связей, то, скорее всего, они работают сообща, даже если стороннему наблюдателю не сразу удается понять, как именно они взаимодействуют между собой.

Встречайте: нейрон!

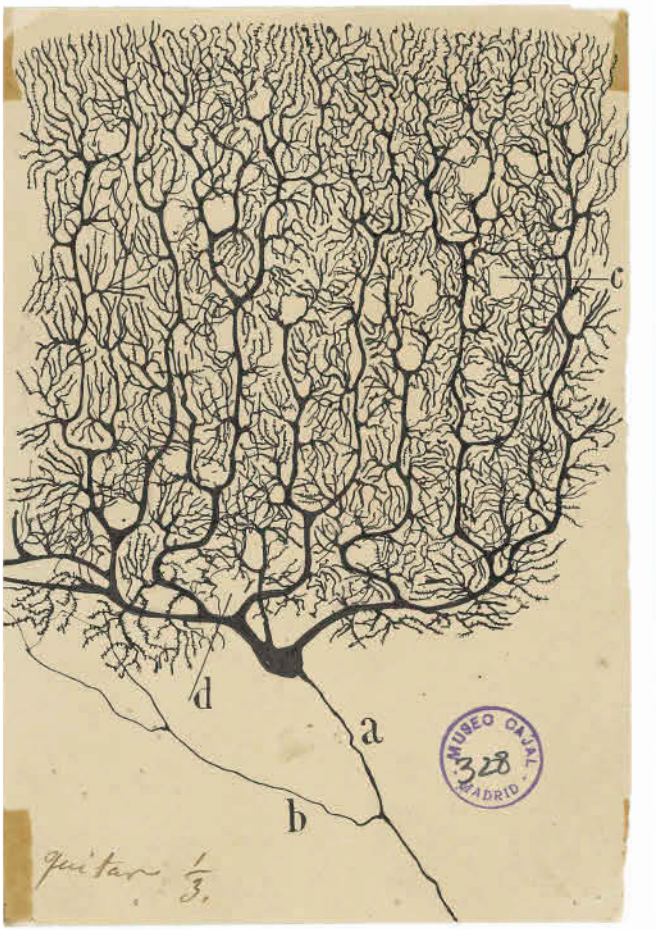


Описание нейронов часто сводится к простой, но достаточно справедливой характеристике: эти клетки представляют собой структурные единицы мозга, его «кирпичики». Нейроны сильно отличаются микроструктурами и выполняемой химической и электрической активностью. В данной книге для них выделена отдельная глава (см. гл. 4), но поскольку мы уже затронули здесь основные особенности анатомии мозга, приведем здесь упрощенное строение типичного ней-

рона. В его центре находится бесформенная «капля» — ***тело клетки***. Эта часть нейрона включает все компоненты, присущие каждой клетке человеческого организма:

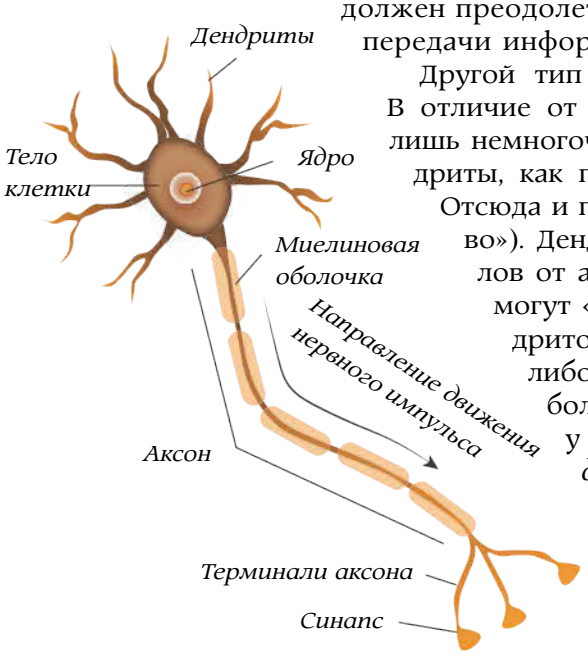
- *ядро* с хромосомами из молекул ДНК, отвечающее за считывание генетической информации из хромосом для синтеза белка;
- крошечные мешочки, напоминающие по форме бактерии, — митохондрии, отвечающие за производство энергии в клетках;
- выстроенные из белка различные *жгутики* и *трубочки*, которые необходимы для поддержания формы клетки и транспортировки химических веществ;
- весь массив клеточных органелл заключен в *клеточную мембрану*, которая обеспечивает клетке важнейшую связь с окружающей средой.

Отличительная от прочих клеток черта нейронов — наличие отростков под названием *нейриты*. Согласно изначальной упрощенной точке зрения, выделяют два четко различимых типа нейритов.



Зарисовка обильно ветвящихся дендритов микроскопистом Сантьяго Рамоном-и-Кахалем

От тела каждого нейрона отходит *аксон,* проводящий сигналы от клетки. Именно из аксонов состоят нервные волокна. На конце аксона расположена округлая *терминаль*, контактирующая с другими клетками (обычно с другими нейронами). Именно этот крошечный промежуток в месте контакта двух клеток — *синапс* — должен преодолеть нервный импульс для последующей передачи информации.



Другой тип нейритов носит название *дендриты*. В отличие от аксонов, которые могут образовывать лишь немногочисленные «ветви» ближе к концу, дендриты, как правило, разветвляются снова и снова. Отсюда и происходит их название (от греч. «дерево»). Дендриты выступают реципиентами сигналов от аксонов, хотя терминали аксонов также могут «прижиматься» и к телам клеток. У дендритов нервные окончания располагаются либо на основной части дендрита, либо на более маленьких выростах, различимых у некоторых нейронов и известных как *дендритные шипики*.

Удивительная сеть

К НАСТОЯЩЕМУ МОМЕНТУ У ВАС УЖЕ ДОЛЖНО БЫЛО СФОРМИРОВАТЬСЯ УСТОЙЧИВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ О МОЗГЕ ЧЕЛОВЕКА КАК О СЛОЖНОЙ СИСТЕМЕ. Однако вся замысловатость структуры головного мозга раскрывается только на клеточном уровне.

Отростки аксонов и дендритов образуют удивительно гибкую систему. Они производят сотни, а то и тысячи типов нейронов, определяемых структурой их нейритов и адаптированных для огромного множества реле и трансформаторов, которые и составляют основу нашей нервной системы. Аксоны могут быть короткими (соединяющими один нейрон с парой соседних) и длинными (тянущимися от головы до пальцев ног). Некоторые из них примыкают к одному синапсу, а некоторые — к целой серии на одном или разных дендритах. Разнообразие паттернов ветвления дендритов породило названия типов нейронов: звездчатые, веретенообразные, напоминающие люстру с подсвечниками клетки, клетки-канделябры, униполярные кисточковые, колбочковые и даже клетки «с двойным букетом».

Вариативность связей велика, и в общем случае все в значительной мере определяется происхождением клеток. Известно, что каждый аксон может образовывать связи примерно с тысячью других нейронов. Большинство соединений находятся вблизи клетки, в то время как в другие части мозга проникают лишь около четырех связей из 100. Общее количество синаптических связей в мозге значительно превышает суммарное количество нейронов и варьируется от 100 трлн до 1000 трлн — колоссальный показатель, характеризующий способность мозга к восприятию, хранению, обработке и передаче информации. Так что если вы никак не можете вспомнить, куда положили ключи от машины, это точно не связано с недостатком доступного объема памяти.

Существуют и другие типы вариаций. У мыши около 80% всех генов, количество которых примерно совпадает с нашим, экспрессируются в мозговой ткани. Не все из них будут активны в каждой клетке мозга. Различия в экспрессии генов и, следовательно, в синтезе белка довольно велики. Основные гены, экспрессирующиеся в нейронах, участвуют в тонкой настройке аксональных и дендритных мембран,

Типы нейронов

синтезе и распределении нейротрансмиттеров и создании рецепторов, которые реагируют на высвобождение нейротрансмиттеров и передают сигнал внутрь клетки. Все это влияет на отправление и декодирование сообщений в нервной системе. Современные технологии позволяют нам детально исследовать даже небольшие участки нейронной сети. Тем не менее поэтическая фраза Чарльза Шеррингтона о том, что мозг — это «волшебный ткацкий станок, где миллионы мерцающих челноков плетут легкокрылый узор...», не теряет своей актуальности и по сей день.

Взаимосвязи нейронов сложны и постоянно меняются

Униполярные кисточковые клетки

Колбочковые

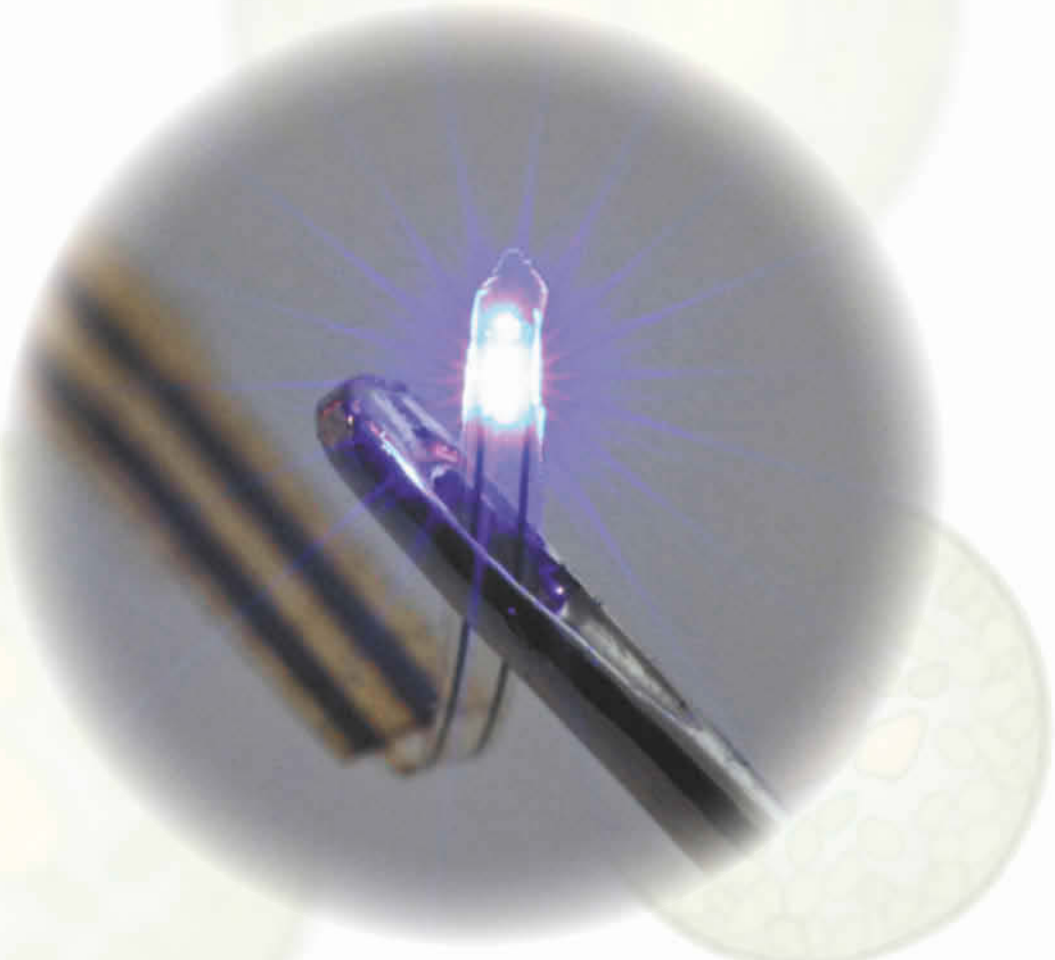
Клетки «с двойным букетом»

Шаг за шагом

Исследователи лучше других знают, до чего невероятно запутана образованная клетками сеть, так что расслабьтесь и получайте удовольствие от пошагового изучения ее структуры.

Конечно, ознакомление будет происходить не с каждым нейроном по отдельности, а сразу с небольшим участком сети. Хотя существует даже одна предельно точная методика, которая позволяет экспериментаторам и вовсе исследовать отдельные клетки в нервной сети. Методика получила название *оптогенетика,* в ее основе лежат техники генетических манипуляций, например, такие как внедрение в клетки особых флуоресцентных белков (*флуоресцентная метка*, см. гл. 1) с целью модификации нейронов, что открывает перед учеными возможность их активации и дезактивации. Описанный метод признали самым революционным в области нейробиологии за последние десятилетия.

Суть технологии заключается в создании таких нейронов, которые будут производить светочувствительный белок. У морских водорослей были найдены *опсины*, которые способны реагировать на возбуждение светом: при воздействии света они пропускают ионы через клеточные мембраны (через них водоросли воспринимают свет, чтобы впоследствии переместиться к нему). Это свидетельствует о том, что у белка есть два состояния, которыми исследователи могут управлять.



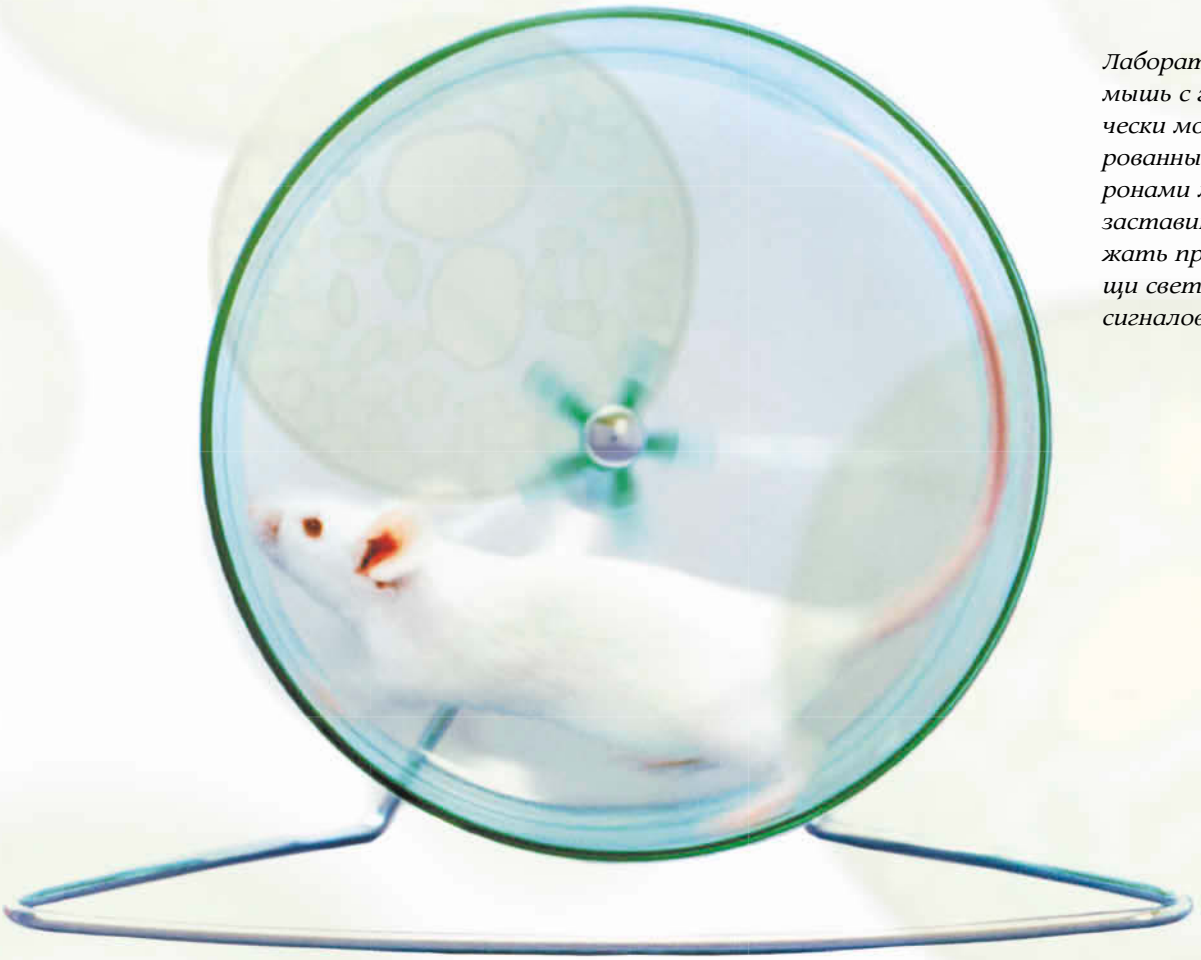
Однажды станет возможным вживление миниатюрных светодиодных индикаторов для регуляции светочувствительных нейронов

Вместо того чтобы полагаться на считываемую с мозга информацию, как это обычно происходит при применении методов сканирования, ученые сами вводят информацию в мозг и наблюдают за результатом.

Метод успешно работает не только с нейронами «в пробирке», но и с живыми существами (правда, лишь до тех пор, пока свет может достаточно глубоко проникать в нервную ткань). При голубом свете белки активируют нейрон, при желтом — дезактивируют.

При изменении цвета меняются и следующие за этим реакции. В ходе одного из первых успешных экспериментов, проведенных на мозге дрозофилы, под контролем находилось около дюжины нейронов из 100 000. При правильной постановке опыта с помощью этого метода можно проверить состоятельность гипотезы о влиянии определенных нейронов или их небольших групп на поведение (подробнее см. гл. 12). Так, световые сигналы, воздействующие на спроектированные нейроны, могут заставить муху улететь, мышь — начать бегать в колесе, а также усилить или запутать воспоминания грызунов.

Поскольку техника включает внедрение генетически модифицированных вирусов, ее применение на людях исключено. Остается надеяться, что с появлением безопасного для человека метода введения светочувствительных белков удастся применить знания, полученные в ходе экспериментов с мышами, для восстановления спинного мозга после травм и даже для восстановления нейронной активности во время депрессии. Однако до клинического применения исследований еще далеко.



Лабораторную мышь с генетически модифицированными нейронами можно заставить бежать при помощи световых сигналов

Глава 3

МОЗГ, ЖИЗНЬ С ТОБОЙ ПРЕКРАСНА

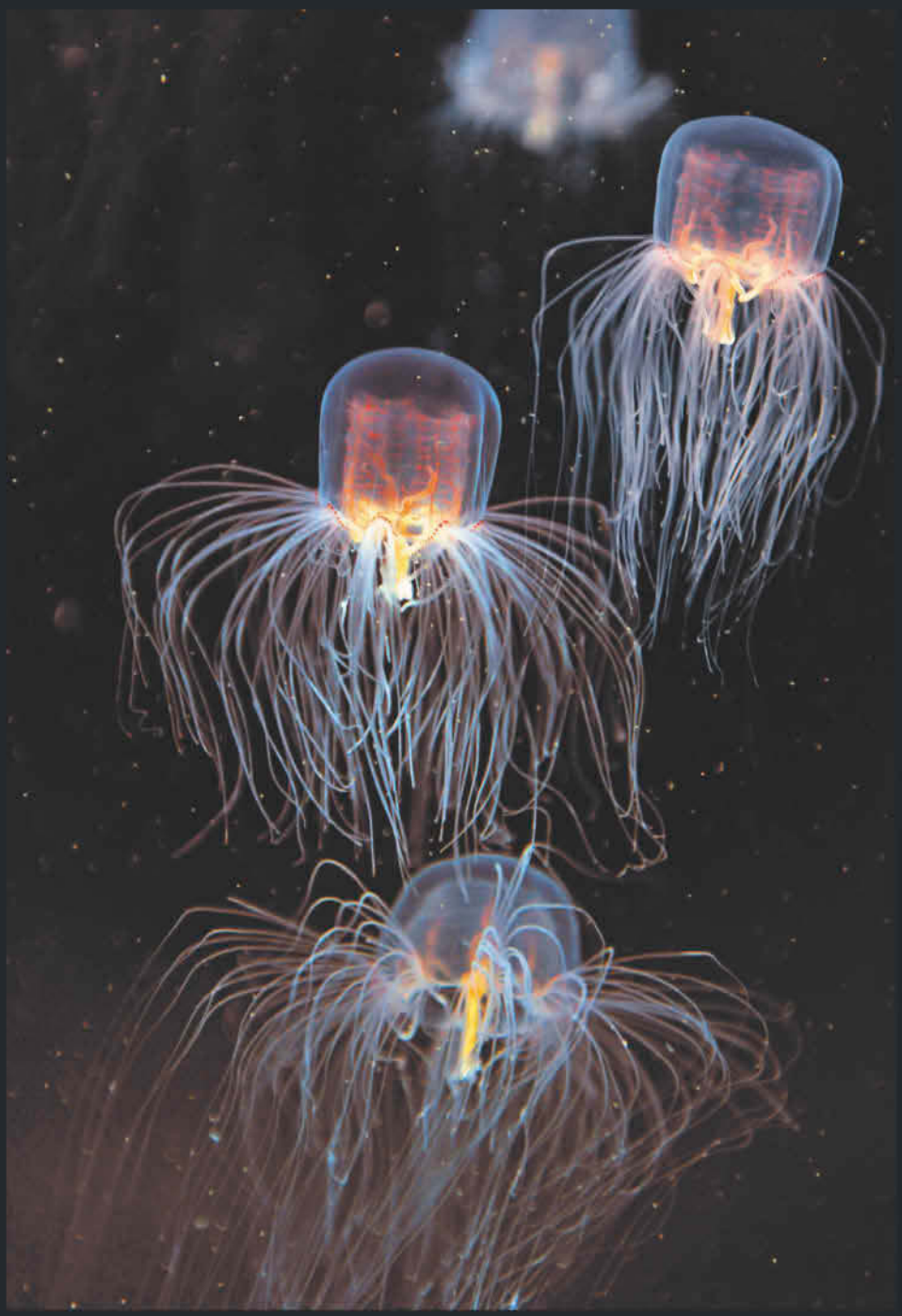
Кому нужен мозг?

Так все-таки для чего же нам нужен мозг? Ведь некоторые организмы прекрасно обходятся без него! С одноклеточными все ясно: у них просто нет выбора. Но как насчет многоклеточных организмов, не имеющих специализированных нервных клеток?

Взгляните на растения в ближайшем саду. Обратите внимание, что они зафиксированы на одном месте. Невольно посещает мысль; «А нет ли связи между передвижением и наличием нервной системы?» Найти ответ на этот вопрос нам поможет асцидия. Личинки этого губчатого создания напоминают извивающихся в воде головастиков, движения которых запрограммированы незатейливой нервной системой, состоящей из глаза, хорды и особого узла нейронов, действующего в роли зачатка мозга, — *церебрального ганглия*. После вылупления личинки отправляются на поиски места на морском дне, где они смогут прикрепиться и провести оставшуюся часть жизни, питаясь планктоном, который отфильтровывают из воды. Очевидно, что для такого образа жизни им больше не нужен зачаток мозга. Глаз, хорда и ганглий исчезают при превращении личинки во взрослую особь. Асцидия — весьма хитроумный организм, приспособившийся на стадии взрослой особи к более простому образу жизни, чем на личиночной. Но стоит разобраться в первоначальном происхождении нервных тканей.

К эволюции мозга нужно подходить опосредованно; кости черепа проходят процесс *фоссилизации*, мягкие ткани разлагаются. Воссоздание истоков происхождения нейронов и их сетей существенным

Свободно плавающая личинка асцидии и скопление зрелых асцидий, уже неподвижных на данном этапе развития

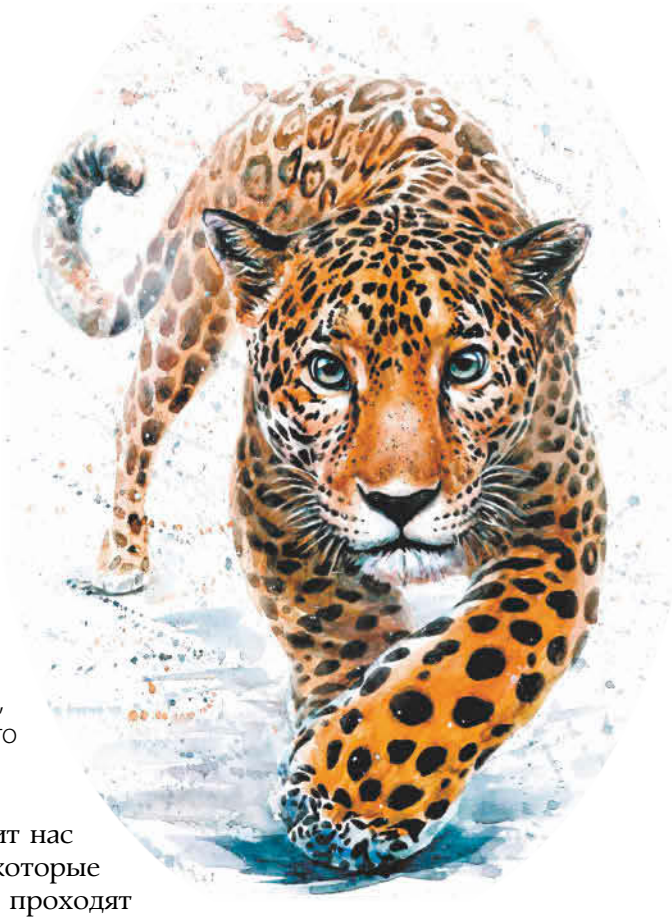


Кубомедуза: без мозга, но с нервным сплетением

образом зависит от изучения жизни в том виде, в котором мы знаем ее сейчас, и определения того, на какие исчезнувшие виды похожи современные организмы. Такое сопоставление может ввести в заблуждение, однако позволяет проследить эволюционный путь развития от простых организмов с простой нервной системой.

История берет свое начало глубоко под водой, где-то между губками и группой, включающей медуз и актиний. Несмотря на многоклеточное строение, в губках совершенно нет нейронов. У медуз уже есть зачатки нервной системы в виде нейронной сети с диффузно расположенными нейроноподобными клетками. Нейронные сети существуют уже около 550 млн лет — довольно продолжительный период, но все же на 3 млрд лет короче истории жизни на Земле.

Разная симметрия



Нервная сеть обладает куда большими способностями, чем знали биологи до недавнего времени. Она может привязать сенсорные сигналы к действиям: например, во избежание высокой концентрации солей медузы погружаются в глубь воды. У одного из видов кубомедуз даже есть глаза, которые способствуют навигации в толще воды. Развитие нервной системы, схожей с нашей, и более сложное поведение сопровождаются значительными изменениями в организации тела. Для медуз и подобных им видов характерна радиальная симметрия, а мозг, вплоть до двух полушарий коры головного мозга, билатерален.

История развития нервной системы знакомит нас с червями, моллюсками и головоногими, некоторые из которых отличаются остротой ума. Они проходят свой тернистый эволюционный путь так же, как и нематоды и членистоногие — насекомые, пауки, ракообразные и т. д. Все эти виды составляют базу проекта сравнительной нейроанатомии. Мы остановимся на позвоночных со сходным билатерально-симметричным планом строения, сформировавшимся более 500 млн лет назад, для которого характерно наличие центрального нервного канала, соединяющего части тела с выростом из нейронов на одном конце.

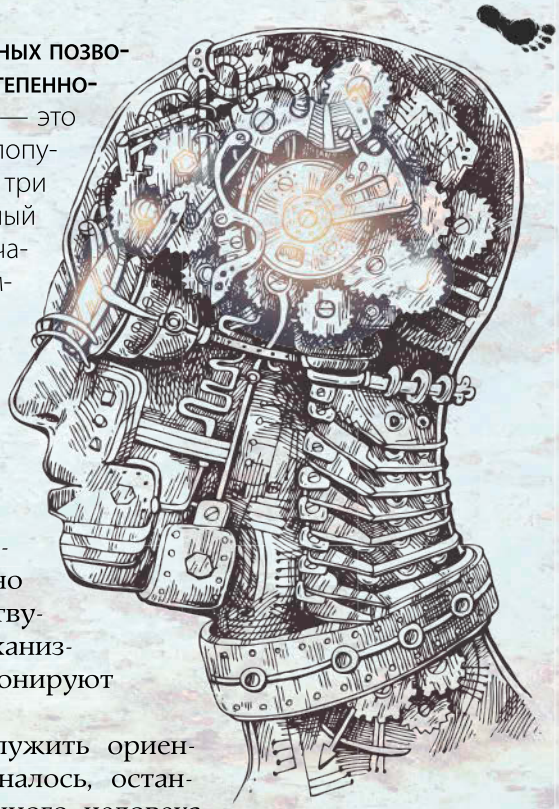
Подобным образом устроены рыбы, амфибии, рептилии, птицы и млекопитающие: в ходе эволюции их мозг постепенно увеличивался и усложнялся, пока не достиг уровня приматов. Продолжительный процесс развития никем не управлялся, но фактические сведения указывают на мощный фактор, который сдвинул естественный отбор в направлении более гибкого мозга. В результате эволюции животные были наделены возможностью перемещаться в поисках пищи, что также подразумевает охоту за добычей. В то же время простейшие организмы получают выгоду при развитии рецепторов, способных почувствовать приближение опасности (хищника).

Мы не можем сказать наверняка, насколько были полезны для живых существ эти предшественники нервной системы — *протонейроны*. Но как отмечалось в обзоре 2014 года, «импульсные нейроны развились у животных вскоре после того, как они начали охотиться друг на друга».

Представители разных видов позвоночных имеют общий план строения

Маленькими шажками

Сравнительный анализ различных видов позвоночных позволяет легко проследить последовательность постепенного развития мозга, и кульминация этого развития — это мозг современного человека. Согласно одной популярной гипотезе, структуру мозга составляют три эволюционные части. Первая часть — «рептильный мозг» (базальные ганглии переднего мозга), отвечающий за инстинкты; «мозг млекопитающих» (лимбическая система) отвечает за эмоции; но главное достояние — это «мозг человека» (неокортекс), в ведении которого находится разум.



Однако данная гипотеза несостоятельна, и на то существует несколько причин. Все части мозга непрерывно сообщаются, поэтому в высших функциях оказываются задействованы даже якобы примитивные части. Ошибочно полагать, что все компоненты мозга присутствуют в эволюционно завершенной форме: механизмы нашего мозга непрерывно коэволюционируют и по сей день.

История возникновения мозга должна служить ориентиром для нейробиологии. Как уже упоминалось, останки костей черепов и анализ мозга современного человека представляют данные о сравнительной анатомии и развитии мозга. Исследователи могут детально проследить эволюцию мозга даже на молекулярном уровне. Сигнальные молекулы и белки, которые формируют ионные каналы сквозь клеточные мембраны (например, присутствующие у бактерий), приходятся «дальними родственниками»

Наш мозг, сформировавшийся в процессе эволюции, в действительности представляет собой «беспорядочное скопление взаимодействующих деталей»

Эволюция работает методом проб и ошибок... Порой и наука тоже

системам, благодаря которым нейроны обмениваются информацией между собой.

На основании вышесказанного можно сделать вывод, проходящий красной нитью через всю нейробиологию: мозг — не сконструированная машина с идеально выверенными деталями; как и любой другой орган, он постоянно развивается и совершенствуется.

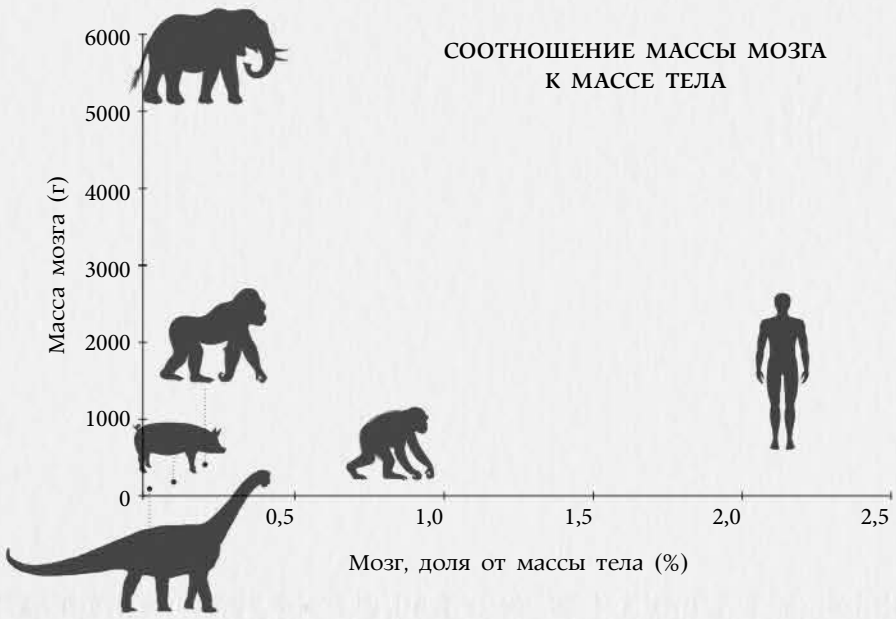
Невозможно сгенерировать идеальную модель мозга автоматически. Эволюция работает методом проб и ошибок, постепенно извлекая и накапливая положительный опыт. Естественный отбор выступал в качестве энтузиаста или хакера, который исследует перспективы разработки новых возможностей, рекомбинируя существующие части или немного их модифицируя. Как писал Фрэнсис Крик в своей публикации «Удивительные гипотезы» (*The Astonishing Hypothesis*), «какой бы странной ни была работа нового механизма, эволюция будет настаивать на его продвижении. Безусловно, итоговый дизайн будет иметь свои шероховатости и скорее напоминать беспорядочное скопление взаимодействующих деталей». Да уж, не самое приятное описание нашего мозга, согласитесь? Зато весьма реалистичное!

Размер имеет значение

Научные наблюдения доказали, что объем мозга у одних существ значительно превышает объем мозга у других, причем прослеживается устойчивая тенденция к увеличению объема мозга в процессе эволюции у всех живых существ.

Столь огромное разнообразие размеров не может не впечатлять. Так, например, у самых маленьких рыб и амфибий класса позвоночных вес мозга составляет 1 мг, в то время как вес мозга кашалота может достигать 8 кг.

Причина вариативности объемов мозга кроется не только в массе тела живых организмов. Черная касатка и кашалот имеют сопоставимые объемы мозга. Несмотря на то что увеличение объема мозга находится в пря-



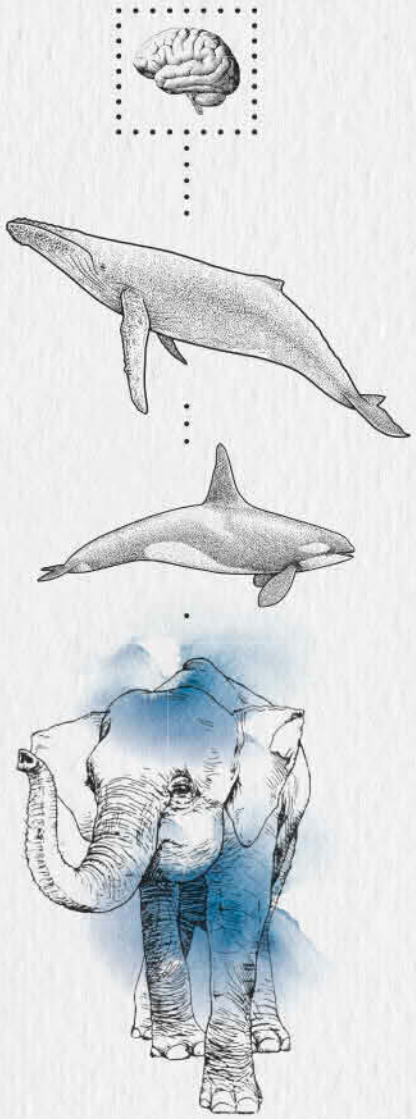
мой зависимости от размера тела, некоторые виды в ходе эволюции приобрели мозг большего объема, чем предполагалось. Мозг слона весит чуть меньше 5 кг и превосходит человеческий, масса которого в среднем составляет 1,2 кг. Однако наш мозг составляет 2% от общей массы тела, в то время как мозг слона — только 0,1%.

Обратимся к приматам. У шимпанзе объем мозга больше, чем у гориллы. Окаменелости наших ближайших предков свидетельствуют об увеличении объема их мозга. Объем мозга *австралопитеков*, населявших Землю 3–4 млн лет назад, составлял от 400 до 450 куб. см — примерно как объем мозга современных шимпанзе. Объем мозга *человека умелого* 2 млн лет назад достигал 700 куб. см, объем мозга *человека прямоходящего* 1,8 млн лет назад — 1000 куб. см.

Объем мозга *человека разумного* составляет 1500 куб. см — значит, человек стал разумным благодаря объему мозга? На деле все не так просто. Обнаруженные недавно окаменелости несколько усложняют историю эволюции человека: некоторые представители с небольшим мозгом появляются значительно позже, чем предполагалось ранее, а некоторые части мозга увеличились в размерах больше других. Изменения недавнего времени в большинстве своем затронули кору головного мозга.

Толщина коры полушарий и плотность нейронов в ней также неодинаковы у разных видов. У человека толщина коры в среднем составляет 3 мм, что превышает аналогичные показатели прочих живых организмов (1 мм у дельфинов). Как следствие, и количество кортикальных нейронов в нашем мозге (15–20 млрд) больше, чем у всех млекопитающих, за исключением как минимум одного вида дельфинов.

Тем не менее корреляции между уровнем интеллекта и объемом мозга нет: так, мозг Эйнштейна был легче (на 200 г) мозга среднестатистического человека.



Что наделяет мозг интеллектом?

Приятно, что нашему изучению поддается такой сложный механизм, как мозг. Исследования истоков когнитивных способностей — особенности, особенно выделяющей человека, — приводят нас к колоссальному объему коры головного мозга в совокупности с огромным числом клеток. Давайте проверим, могут ли они объяснить наличие у человека интеллекта.

Увы, тайны работы коры головного мозга нам еще неподвластны, так что опустимся с небес на землю и обсудим не менее важный вопрос: может ли сравнительная анатомия головного мозга в общих чертах поведать нам об условиях, соблюдение которых необходимо

для наличия интеллекта? Ответ во многом зависит от того, что именно мы понимаем под термином «интеллект». Если другие живые существа развили мозг в процессе эволюции для выживания в изменяющихся условиях, мы, люди как вид, нуждаемся в более обширном определении, чем просто говорящая обезьяна.

Согласно нейтральному для всех видов определению, интеллект можно охарактеризовать как некую способность гибко вырабатывать новые модели поведения в непредвиденных ситуациях для решения проблем. При таком условии интеллектом обладают только некоторые виды:

- осьминоги, строение головного мозга которых сильно разнится с мозгом человека;
- некоторые рыбы;
- социальные насекомые, такие как муравьи и пчелы;
- некоторые виды птиц, в особенности попугаи и вороны;
- и млекопитающие в целом.

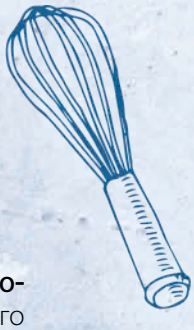
Все эти разные живые организмы по-своему демонстрируют проявление интеллекта

Несмотря на видовые отличия, перечисленные виды имеют общие нейроанатомические компоненты: а) больший объем мозга в сравнении с объемом мозга родственных им видов с менее развитой умственной активностью; б) легко распознаваемые области мозга со скоплениями активно взаимодействующих нейронов; в) области с повышенной активностью за счет короткого расстояния между нейро-

нами; соответственно, длина аксонов между ними тоже невелика, так что последние способны быстро передавать сигналы.

Это справедливо даже для такого крошечного примера, как мозг насекомых, который, казалось бы, на первый взгляд кажется совершенно не похожим на наш. Мозг насекомых представляет собой высокоразвитый ганглий, обрабатывающий визуальную информацию и сигналы от антенн. В мозге социальных насекомых парная структура, известная как *грибовидные тела*, достигла больших размеров и взяла на себя интеграцию всей поступающей информации, разработку ловких маневров и навигацию. Пчел в лаборатории можно обучить передвигать небольшой мячик за награждение в виде кусочка сахара — довольно умно для существа с 300 000 нейронов!

Ты — это то, что ты ешь



Относительно большой объем человеческого мозга породил множество теорий о том, что же послужило толчком к его увеличению. С эволюцией нашего мозга связывали сложные социальные взаимодействия, охоту и свежевание, использование орудий, прямохождение, развитие языка и речи. Сложно установить, что именно стало первопричиной в каждом случае: совершенствование мозга или развитие новых способностей.

Жизненные реалии создают более прочный фундамент теории. Энергия и пища для ее выработки являются важнейшими условиями существования живых существ. Проблема заключается в следующем. Объем мозга человека превышает объем мозга ближайших родственников — приматов. Наша плотная масса нейронов нуждается в большом количестве энергии, чтобы управлять постоянно мерцающей сетью клеток: 20% (т. е. пятая часть) энергии, потребляемой человеческим телом в состоянии покоя, отводится именно на деятельность мозга. Представители семейства приматов преимущественно травоядные: бóльшую часть дня горилла проводит пережевывая листву. Увеличение объема мозга требует поступления в организм бóльшего объема энергии, а следовательно, и увеличения количества потребляемой пищи, что, в свою очередь, влияет на увеличение размеров пищеварительного тракта для последующего преобразования поступающей пищи в энергию. Впрочем, пищеварительный тракт человека уменьшился, в то время как объем мозга увеличился. Мог ли наш рацион повлиять на произошедшие изменения?

Ричард Рэнгем признает, что не все продукты требуют приготовления

Британский приматолог Ричард Рэнгем из Гарвардского университета утверждает, что включение мяса в рацион значительно повлияло на протекание всех процессов в организме. А умение пользоваться огнем сделало пищеварение более эффективным: при-

готовленная на огне пища обладает бóльшим количеством калорий. Однако возникает некоторое несоответствие во временны́х периодах: есть свидетельства о том, что увеличение объема мозга произошло до того, как первобытные люди освоили огонь. Но зубы точно приспособились к еде, требующей меньших усилий для пережевывания, очень рано в ходе эволюции человека. Таким образом, весьма вероятно, что кулинария сделала из нас человека разумного, т. е. поспособствовала развитию нашего интеллекта.

Существует еще одна версия о влиянии огня на развитие когнитивных способностей. Первобытные люди не задерживались на одном месте в течение длительного времени, а вели кочевой образ жизни. Для поддержания огня требовалось разрабатывать план действий и вовремя добывать горючее, чтобы пламя не погасло. Оба процесса — как заготовка запасов еды, так и сбор достаточного количества древесины для поддержания огня ночью — происходили одновременно. Прежде чем первобытные люди научились разводить огонь самостоятельно, тлеющие в золе угольки надо было как-то защищать от осадков и переносить с собой. Костер предоставлял каждому возможность получить приятный бонус в виде тепла и потому вызывал неподдельный интерес даже у тех членов общины, которые отлынивали от сбора хвороста. Образ жизни вокруг огня и обусловил тот самый переход первобытных людей на новый уровень планирования, сотрудничества и социальной чувствительности, который предъявил новые требования к объему мозга.

Умение готовить пищу на открытом огне — результат сложной социальной организации

Прирученный мозг

Но объем мозга сам по себе не является ключевым фактором развития интеллекта. В доказательство этому можно привести следующий факт: череп неандертальцев вмещал в себя мозг большего объема, чем череп человека разумного. Есть и другие факты, способные поставить вас в тупик.

Рассмотрим мозг дикого животного, например волка, и его прирученного родственника сходных размеров — американского эльзасца, или восточноевропейской овчарки. Сравнительный анализ показал, что объем мозга представителя дикой природы в этой паре оказался на целых 30% больше. Аналогичные показатели демонстрируют и другие одомашненные виды: домашние свиньи и дикие кабаны, домашние кошки и дикие коты. Однако мы не можем полностью генерализировать эти результаты, поскольку искусственно выводили домашних животных, не в последнюю очередь руководствуясь их размерами.

Лишь у интенсивно откармливаемых куриц, с трудом сохраняющих равновесие из-за быстрого набора массы тела, объем мозга превышает аналогичный показатель своих диких предков. Тем не менее одомашнивание по большей части вносит свои коррективы в объем мозга. Вот еще один весьма любопытный факт, обнаруженный при изучении окаменелостей первобытных людей со всего мира: за последние 10–20 тысяч лет объем человеческого мозга также сократился.

Частично тенденция к уменьшению объема мозга может быть связана с размерами тела, которые, кстати говоря, также пошли на убыль. Но как объяснить все остальное? Может быть, мы тоже, так сказать, «одомашнились»?

Между одомашниванием животных и современной культурой людей, как ни странно, существует сходство. Домашних животных кормят и оберегают от нападений хищников; поселения земледельческих племен предоставляли, возможно, схожие преимущества их жителям. С другой стороны, натуральное сельское хозяйство часто сопряжено с недостаточностью питания, которая ставит под угрозу рост и развитие мозга.

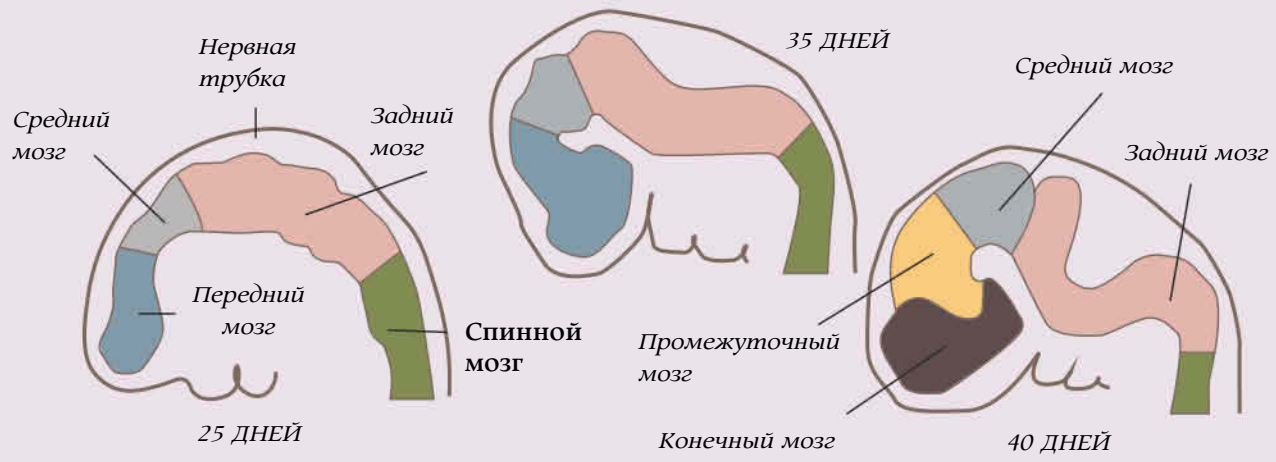
Возможно, сокращение объема нашего мозга связано с частичным изменением его функций и задач. Например, нам в эпоху смартфонов легко мысленно формулировать предложения; а вот во времена первых земледельцев это было далеко не так просто, и такое положение дел сохранялось вплоть до изобретения человеком письменности.

Сокращение объема мозга подкрепляет гипотезу о том, что именно сложное внутреннее устройство мозга, а не его объем, порождает интеллект. Данная идея заставляет задуматься о возможном будущем человечества. Курт Воннегут в своем романе-антиутопии «Галапагосы» поднимает проблему негативного влияния «больших мозгов» — человеческого прогресса. По сюжету, через 1 млн лет наши потомки вернулись к водному образу жизни и видоизменились: у них появились клюв, ласты, обтекаемый череп и маленький мозг.

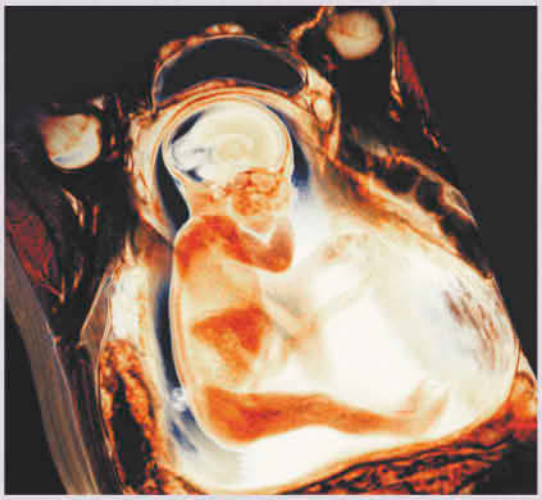
Развитие мозга у эмбриона

История развития мозга охватывает значительную часть эволюционной истории, которая каждый раз начинается заново при превращении оплодотворенной яйцеклетки в нового человека. Этот изученный в точности до мельчайших подробностей процесс развития протекает одинаково у всех позвоночных. Вот как все происходит.

На раннем этапе развития эмбрион представляет собой многоклеточный шарик, который делится по мере своего развития. Через несколько недель из клеток формируются слои. Одна область наружно-



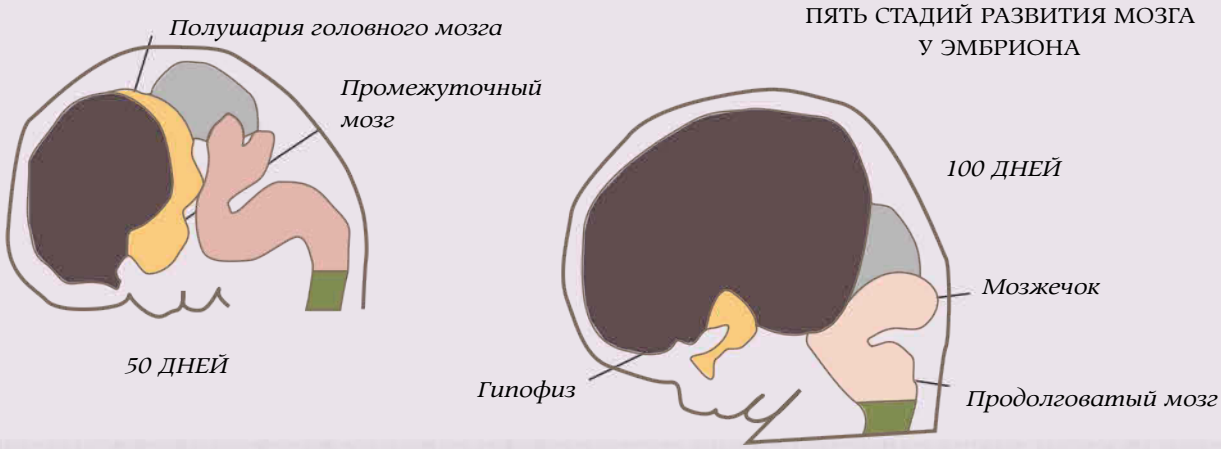
го слоя уплотняется и складывается, образуя углубление, а затем отдельную трубку: из этой структуры впоследствии формируются головной и спинной мозг. Полая, заполненная жидкостью трубка развивается в желудочки полностью сформированного мозга. Процесс созревания необычайно сложен, но при ближайшем рассмотрении оказывается, что различные части головного мозга формируются путем разрастания стенок желудочков. В течение двух месяцев у растущего эмбриона человека появляются зачатки переднего, среднего и заднего мозга, а спустя еще месяц уже можно легко распознать оформленный мозг.



Растущий мозг отчетливо виден на МРТ-сканировании восьмимесячного плода

Эмбриональное развитие всецело зависит от высокоточных передвижений клеток; некоторые из них мигрируют на довольно большие расстояния, чтобы достичь конечного пункта назначения, и развитие коры головного мозга — замечательный тому пример. Кора головного мозга считается сформированной при наличии шести слоев. Все клетки происходят от стволовых клеток возле соответствующего желудочка, а затем поднимаются вверх до нужного слоя. Миграция клеток может занимать больше двух недель. Глиальные клетки образуют из волокон пути, по которым следуют нейроны. Химические сигналы обеспечивают движение нейронов в правильном направлении мимо уже выстроенных слоев. Некоторые такие сигналы, например большая молекула *рилин* — секретируемый наружным слоем нейронов белок, — уже хорошо изучены. Недостаток рилина у мышей приводит к инверсии коры головного мозга и необычной «закрученной» походке.

Мигрирующие корковые клетки — это в основном нейроны. В плоде развивающегося человека может формироваться более 250 000 нейронов в минуту. Почти все нейроны, из которых полностью сформированный мозг будет состоять в течение жизни, образуются в ходе эмбрионального развития. Рост мозга не завершается на этапе появления нейронов, однако череп уже достигает нужных размеров с учетом того, чтобы голова ребенка все еще смогла пройти через тазовый пояс женщины во время родов. Приближается время появления на свет!



Мозг новорожденного

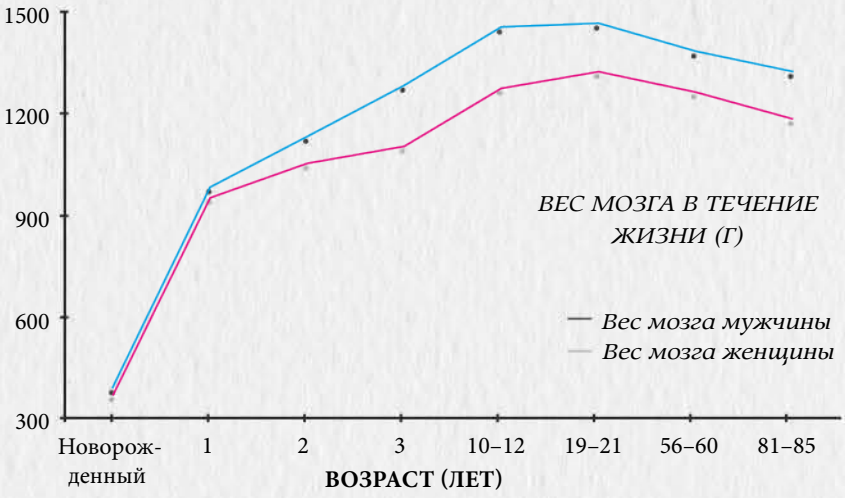
Развитие мозга продолжается еще долгое время после рождения. Мозг новорожденного ребенка — кипучая масса нейронов. За девять месяцев развития формируется огромное количество синаптических связей. Длинные нервные пути, расположенные в белом веществе, связывают разные области мозга. Подобно миграции нейронов рост аксонов сопровождается сложными механизмами передачи сигналов, чтобы их терминали оказались в правильном месте. Но образования микроструктур мозга еще не произошло.

На этом этапе нейронам предстоит установить свою роль в будущем мозге. К этому моменту нейроны уже образовали связи, поскольку в случае несформированности нервных связей с другими клетками запрограммирована гибель нейронов. Вообще, нейроны создают гораздо больше синапсов, чем мозг в состоянии использовать. Множество других связей образуется в мозге младенца сразу после рождения, и во многих областях мозга их количество достигает максимума уже в течение первого года жизни ребенка. У годовалого ребенка в два раза больше синапсов, чем у взрослого человека. После этого, несмотря на образование новых синаптических связей, их общее количество начинает уменьшаться, поскольку глиальные клетки разрывают лишние соединения.

Мозг формируется по генетически заложенному плану:

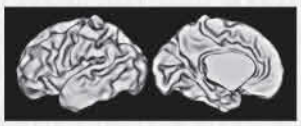
- какие типы нейронов создавать;
- их места назначения;
- основные пути передачи сигналов между областями мозга.

Дальше под влиянием жизненного опыта следует медленный, затяжной путь тонкой корректировки. Информация, получаемая от органов чувств, — свет, цвета, движения, звуки, прикосновения, вкусы, запахи, тепло и холод — буквально бомбардирует ребенка и его мозг. Едва ли можно было получить ее в утробе. Начинаются процессы, продолжающиеся всю жизнь: процессы организации, реорганизации, удаления си-

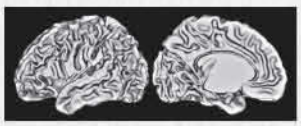


наптических связей, которые лежат в основе обучения, памяти и мышления (подробнее см. гл. 5–8). С развитием мозга появляется все больше глиальных клеток и белого вещества, богатого нервными соединениями. Вес мозга новорожденного ребенка близок к весу мозга новорожденного шимпанзе и составляет 0,5 кг. Но мозг ребенка человека развивается с огромной скоростью: за первые три месяца жизни он достигает больше половины своего взрослого веса, а уже к четырем годам первоначальный вес утраивается.

ФОРМИРОВАНИЕ БЕЛОГО ВЕЩЕСТВА

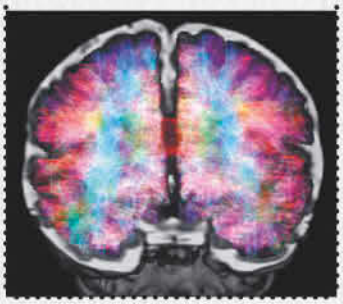


32 недели



36 недель

40 недель



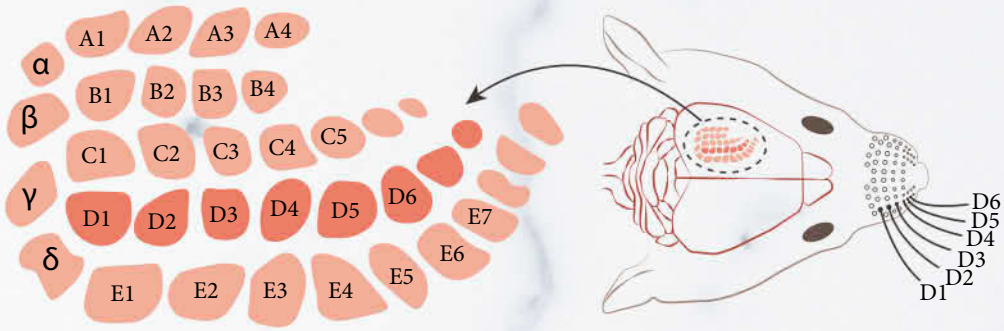
Критический период

Новорожденная мышь еще не сталкивалась с раздражителями внешней среды посредством своих длинных усов. Грызуны ведут ночной образ жизни, поэтому для них характерно наличие большого скопления нейронов (известного также как ***баррельная кора***), которые связаны с каждым отдельным усиком для сбора жизненно важной сенсорной информации. Если усы не трогать, соответствующие им нейроны научатся обрабатывать поступающую извне информацию, но если обрезать их у мыши сразу после появления на свет, этого не произойдет, и мышь уже никогда не научится в полной мере пользоваться своими усиками. Любопытно, но если обрезать усы в более зрелом возрасте, таких последствий не будет; более того, удаление у взрослой особи одного-двух усиков стимулирует баррельную кору изменить нейронные связи в соответствии с оставшимися усиками.

Чтобы запустить все процессы одновременно, мозгу пришлось бы проделать слишком большую работу. Те, кто проводит время с младенцами, знают не понаслышке, что все происходит поэтапно. С развитием мозга развивается и сам человек, его способности. Размер мозжечка, главным образом отвечающего за регуляцию движений, через месяц после рождения увеличивается вдвое; гораздо медленнее протекает развитие гиппокампа, который участвует в процессах, связанных с памятью.

Исследование животных и людей показало, что для правильного развития многих зависимых от мозга способностей необходимы внешние стимулы. Некоторые способности запрограммированы та-

Уверенная походка появляется только при полном формировании мозжечка



Мыши сканируют усами пространство и таким образом составляют в голове карту для быстрого ориентирования

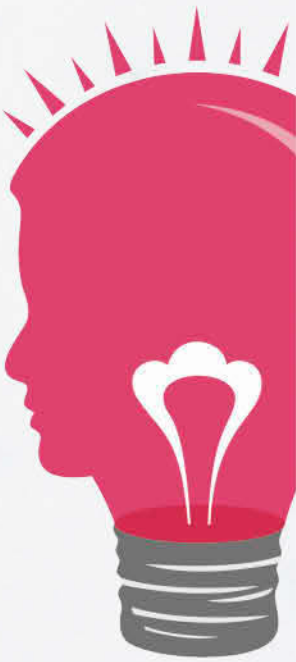
ким образом, что внешнее стимулирование должно произойти в течение определенного периода времени. Баррельная кора мозга мыши является наглядным примером области мозга, обладающей критическим периодом для развития.

В случае с человеком аналогичным примером является зрение. Острота зрения и восприятие глубины пространства ухудшаются, если у ребенка есть «ленивый глаз», который не может хорошо сфокусироваться или смотреть в нужном направлении. Если вовремя обнаружить это заболевание и вылечить его до достижения ребенком возраста 5–6 лет, зрение будет полностью сформировано, в противном случае — менее вероятно.

Критические периоды есть и для развития некоторых аспектов речи и языка. Так, большинству людей, которые изучали тот или иной иностранный язык в подростковом возрасте, очень сложно научиться говорить на нем без акцента.

В основном мозг легко адаптируется к новым условиям и задачам. Создание и разрушение нейронных связей продолжается на протяжении всей жизни, хотя изучение чего-то совершенно нового, например нейробиологии, с возрастом становится все труднее.

Мужской мозг, женский мозг



Отличается ли процесс развития мозга у мужчин и женщин? Время от времени появляются ратующие за существование разницы научные исследования, но полагаться на них ненадежно. В этом разделе приведены наиболее достоверные факты.

Если обратиться к статистике, то мы обнаружим, что в среднем объем женского мозга меньше мужского, но ведь и сами женщины миниатюрнее. На мозг также воздействуют половые гормоны, влияющие на эмбриональное развитие и половую дифференциацию. Но любые последующие долгосрочные анатомические и поведенческие различия следует рассматривать в совокупности с воздействием окружающей среды и социума.

Изображение, составленное на основе данных различных сканирований, показывает в среднем более сильные связи между областями в передней и задней частях мозга у мужчин

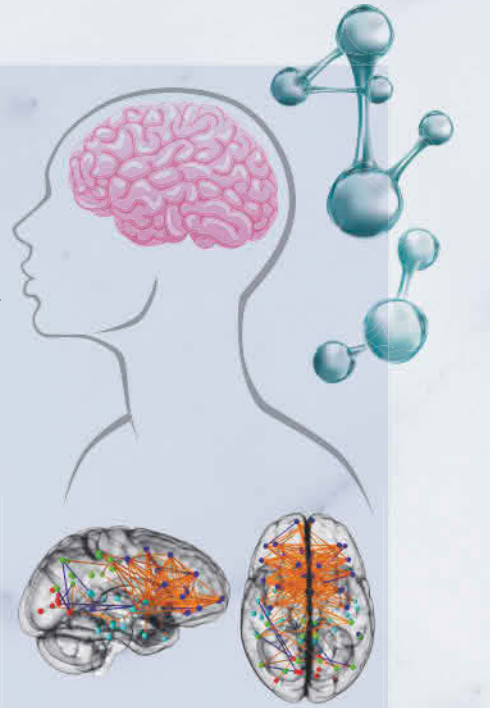
СВЯЗИ, ПОЛУШАРИЯ И ХАЙП

В 2013 году в ведущем американском журнале Proceedings of the National Academy of Sciences была опубликована научная статья, в которой были представлены результаты исследования нервных путей головного мозга более тысячи человек с использованием новой техники МРТ — диффузионно-тензорной МРТ. Данная методика позволяет регистрировать движения молекул воды, которые прокладывают свой путь преимущественно вдоль нервных волокон, таким образом показывая расположение нервных связей.

Результаты исследования продемонстрировали выраженные различия между мозгом мужчины и женщины в коннектомах: в мужском мозге больше связей между передней и задней частями в каждом полушарии, чем в женском. Однако при этом у женского мозга больше связей между самими полушариями.

По мнению авторов исследования, пусть результаты и статистические, но они выступают доказательством «принципиальных различий в архитектуре человеческого мозга». В частности, они считают, что «структура мозга мужчин обеспечивает согласованность восприятия и действий, в то время как строение женского мозга способствует взаимодействию аналитических и интуитивных процессов». Для наглядности ученые снабдили статью удобной диаграммой, в которой сделан акцент на отличающиеся участки коннектома.

Это потрясающее, но несколько переоцененное исследование сразу же попало в заголовки прессы по всему миру. Критики отметили отсутствие подробного описания связей — общности, в среднем не имеющей отличий. Не была приведена четкая информация о сравнении межполовых различий и различий внутри каждого пола. Возрастной диапазон участников исследования (8–22 года) включал тех, что проходили через изменения, связанные с подростковым возрастом, когда различия кажутся колоссальными (см. подробнее параграф «Мозг подростка»).

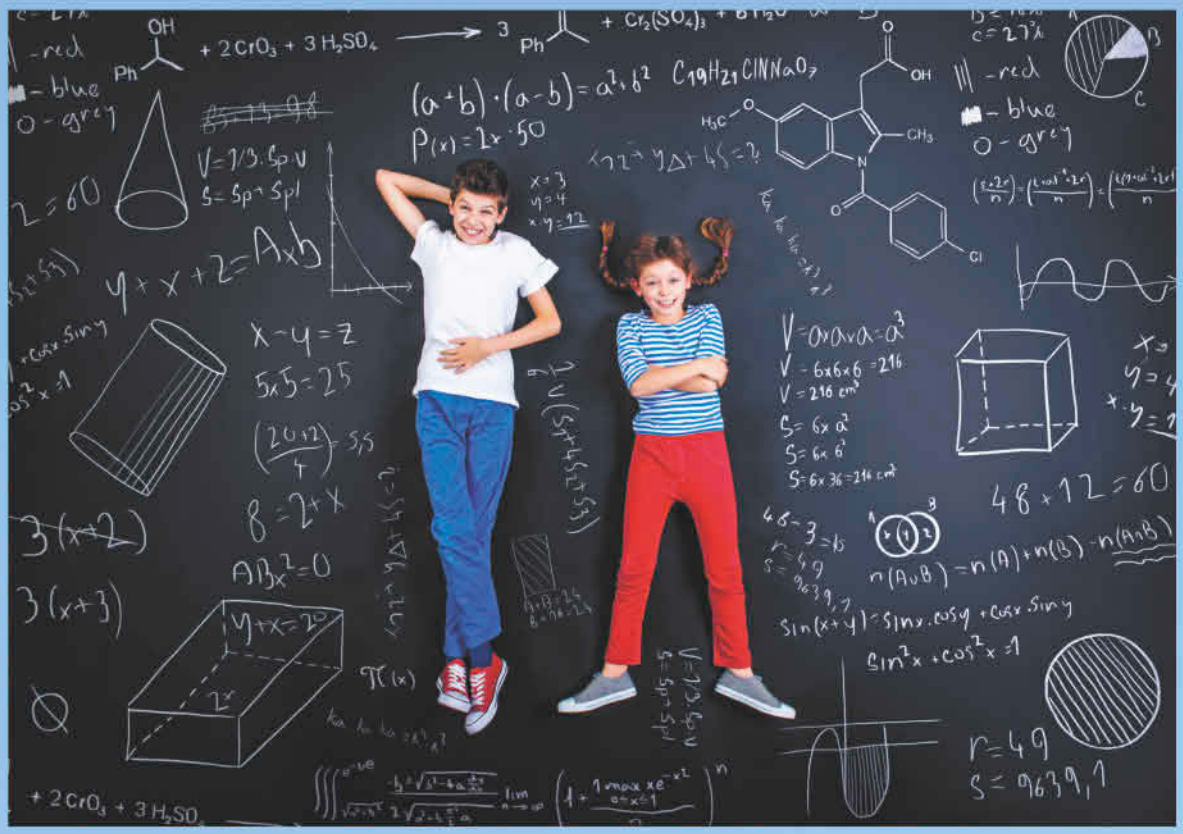


Изображение, полученное аналогичным путем, отображает более сильные связи между полушариями головного мозга у женщин. Следует отметить, что существуют и многие другие нервные пути, для которых не показаны подобные различия, но на данной иллюстрации они отсутствуют

Было бы интересно посмотреть, возможно ли воспроизвести полученные результаты и соотнести их с поведением. Между тем неясно, сохраняются ли выявленные различия с возрастом. Иронично, но в статье говорилось о «врожденных» различиях между женщинами и мужчинами, хотя разнородные результаты в группах разных возрастных категорий могут в равной степени указывать на пластичность мозга, поскольку он продолжает развиваться.

Существуют примеры четких различий в определенных областях мозга у самцов и самок других биологических видов. Возьмем певчих птиц: каждую весну самец исполняет для самки новую серенаду, но не наоборот. Для запоминания такого количества песен в головном мозге самца имеется определенная область увеличенного размера. В биологии это явление носит название «*половой диморфизм*»: наличие двух различных состояний, характерных для разных полов. Понятия «половой диморфизм» и «половые различия» не синонимичны: вторые являются средними описательными характеристиками для популяций, где разница между полами несколько стирается.

Не стоит путать два этих понятия, как это часто бывает в дискуссиях о различиях между «мужским» и «женским» мозгом. Существует несколько хороших статистических примеров различий в анатомии мозга. Так, например, у мужчин размер ядра гипоталамуса в среднем примерно в два раза больше, чем у женщин; в то же время треть всех мужчин обладают гипоталамусом «женского» размера.



Объем мозга у мужчин в среднем больше, чем у женщин, но только потому, что и тело мужчины в среднем крупнее

Гораздо важнее то, что как бы ни различались между собой определенные группы людей, в большинстве аспектов мозг у них всех одинаков. Автор одной статьи 2016 года заметил: «Человеческий мозг лучше описывается как принадлежащий одной неоднородной популяции, нежели двум отдельным популяциям».

Критики преувеличенных утверждений о различиях между мужским и женским мозгом говорят, что эта тема изобилует так называемым нейросексизмом. С другой стороны, требовалось скорректировать допущение, присутствующее во множестве нейробиологических исследований и подразумевающее, что изучение мозга мужчины раскроет все, что необходимо знать о мозге человека.

Подростки способны пойти на риск, неприемлемый для взрослых людей

Мозг подростка

Ни для кого не секрет, что анатомия, физиология и поведение человека претерпевают изменения в подростковом возрасте. До недавнего времени считалось, что практически весь процесс развития мозга завершается в течение первых нескольких лет после рождения. Однако результаты исследований посредством МРТ-сканирования за последние 20 лет показали, что мозг подростков продолжает меняться. И действительно, некоторые важные процессы формирования мозга не завершаются даже к третьему десятку.

Изменения приводят к значительной реорганизации некоторых областей мозга, главным образом коры головного мозга. Структурный анализ показывает, что объем серого вещества в целом уменьшается, а богатого нервными связями белого вещества — наоборот,

Жизнь подростка можно описать состоянием «эмоциональные американские горки»

увеличивается. Этот процесс сопровождается усилением *миелинизации*, которая способствует образованию более изолированных нервных волокон с высокой скоростью проведения импульсов и трансформации серого вещества в белое в некоторых областях мозга. Уплотняется мозолистое тело, обеспечивающее связь между полушариями. Также существует предположение, что на микроуровне, вне досягаемости сканеров, дендриты становятся еще более ветвистыми.

Все это сопровождается и другими, более тонкими изменениями, в том числе сокращением синаптических связей. Перестройка взаимосвязей нейронов в мозге занимает годы, начинаясь с задней части мозга и постепенно продвигаясь вперед.

Согласно результатам исследования при помощи фМРТ, для решения некоторых задач подростки привлекают различные области мозга. Например, в юношеском возрасте медиальная префронтальная кора головного мозга проявляет бóльшую активность при осмыслении действий других людей, чем в зрелом. Это вовсе не означает, что подростки хуже распознают чужие намерения; просто они могут воспринимать окружающий мир несколько иначе. Это согласуется с предположением британского исследователя Сары-Джейн Блейкмор: по ее мнению, мозг подростков претерпевает изменения, соответствующие тем аспектам социальной жизни, где для развития взрослой компетенции требуется время.

Как и всегда, точные взаимосвязи между структурой мозга и поведением по большей части неясны. Но данные, полученные в результате изучения строения мозга в более крупном масштабе, позволяют предположить, что способности рационально мыслить и учитывать последствия в подростковом возрасте все еще развиваются и что состояние развития мозга у подростков связано с их социальной чувствительностью, жаждой риска и эмоциональными терзаниями, которому подвержены как минимум некоторые люди. Если именно такими вы помните свои подростковые годы, считайте, что ваш мозг тогда вставал на путь взросления.

Зрелость

Увы, за окончание процесса формирования мозга не вручают диплом. Мы взрослеем, а с нами взрослеет и наш мозг. Объем серого вещества в подростковый период начинает сокращаться (происходит истончение коры головного мозга), и это продолжается до 20 с лишним лет, а иногда и до более позднего возраста. Объем белого вещества, обеспечивающего нейронные связи, продолжает возрастать вплоть до 40 лет у некоторых людей.

Пока мозг сохраняет активность (а он должен оставаться активным), он продолжает меняться: с формированием воспоминаний синаптические связи образуются и распадаются, обучение новым навыкам модифицирует нейронные сети (подробнее см. гл. 7). Настойчивость и усердие помогают изменить привычки и приобрести новые умения. Требуется время, чтобы изменить мировоззрение и поведение, поскольку новый вид мозговой активности вызывает изменения в синапсах. Полученные повреждения, например после инсульта, могут привести к существенной реорганизации и иногда последующей утрате прежних способностей, восстановление которых обычно происходит в течение более длительного периода.

Освоение нового умения, образование новых навыков, формирование новых нейронных связей — все это гармонично связанные друг с другом процессы

БОЛЬШЕ НИКАКИХ НЕЙРОНОВ?

Нервные клетки не обладают высокой способностью к регенерации, поэтому нашему организму приходится использовать то количество, которое было заложено еще на ранней стадии развития. Эта мысль господствовала на протяжении практически всего прошлого столетия (вспомните знаменитую фразу «нервные клетки не восстанавливаются»).

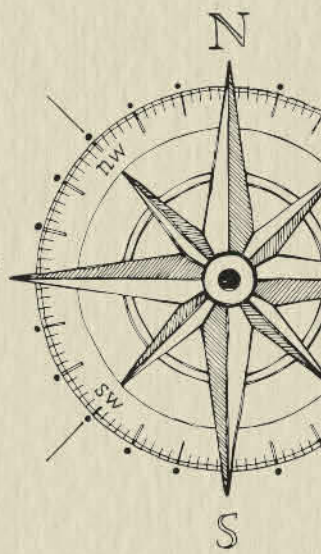
Сейчас картина кажется не такой однозначной. Как мы уже говорили, в мозге певчих птиц, например канареек, имеется специальный отдел, отвечающий за усвоение новой песни. В 1970-х годах было обнаружено, что каждый год в этом отделе формируются новые нейроны. Затем ученые сообщили об обнаружении недавно образованных нейронов у взрослых особей крыс и обезьян. Решающим было исследование 1990-х годов, когда у взрослой особи крысы зафиксировали стволовые клетки, схожие с клетками эмбрионального мозга и способные к образованию новых нейронов.

Стволовые клетки есть и у человека, поэтому большинство ученых полагают, что процесс формирования новых нейронов происходит постоянно. Но не следует радоваться раньше времени. Число новых нейронов невелико — в гиппокампе, например, образуется всего около нескольких сотен клеток в день. Пока не ясно, какова их роль, однако приятно осознавать, что возможность обновления запаса клеток нашего мозга существует.

Возникновение новых нервных клеток у человека, или нейрогенез, открывает возможности стимуляции, а возможно и трансплантации стволовых клеток для восстановления повреждений головного мозга. Тем не менее некоторые вопросы по-прежнему остаются открытыми: например, каким образом можно надежно активировать стволовые клетки и, что не менее важно, как остановить их, если они начнут безудержно размножаться.

Птичий мозг умеет генерировать новые нейроны

Стареющий мозг



Период старения мозга обуславливается физическими изменениями и наиболее явно отражается в постепенном уменьшении его объема: так, к 90 годам потери составляют уже 10%. При этом в качестве компенсации увеличивается размер желудочков.

Наряду с сокращением общего количества нейронов нервные волокна теряют миелиновую оболочку, поддерживающую их работоспособность. Уменьшается число синапсов, а клетки мозга вырабатывают меньшее количество нейротрансмиттеров. Фактический показатель гибели нейронов, однако, оказался существенно ниже, чем предполагалось в XX веке. С другой стороны, исследование стареющего мозга под микроскопом даже у здоровых людей часто выявляет клубки тканей и бляшки, в основном состоящие из поврежденных белков, от которых клетки избавляются.

Любое или даже все из этих постепенно происходящих изменений могут объяснять снижение производительности, которое, как правило, ассоциируют со старением. Среди типичных особенностей старения выделяют:

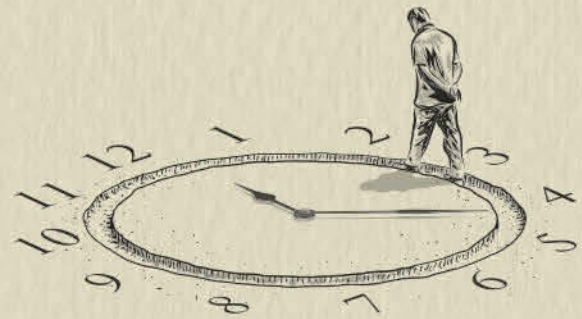
- ухудшение функции памяти, т. е. воспроизведения уже отложившейся информации и запоминания новых вещей;
- замедление когнитивных процессов: с возрастом становится все труднее уследить за длинной цепочкой рассуждений и сконцентрировать внимание, когда несколько разных вещей происходят одновременно.

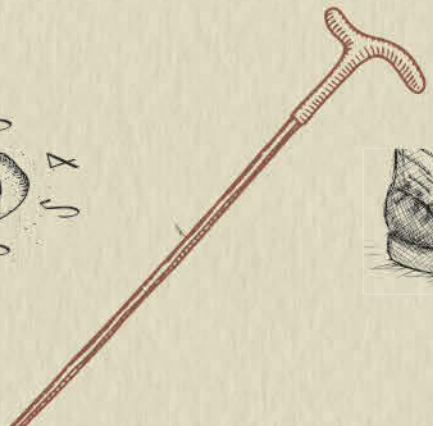
Что касается многозадачности, до сих пор ведутся споры о том, насколько возможна подлинная многозадачность в любом возрасте. Понятие многозадачности может также включать быстрое переключение внимания с одного простого задания на другое.

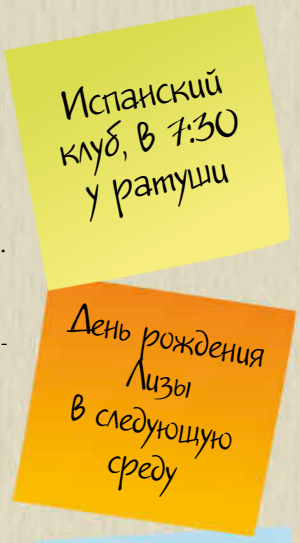
Хотя эти изменения и могут иметь место, они далеко не универсальны. Около 20% людей в возрасте 70 лет ничуть не уступают 20-летним в решении когнитивных тестов. Ученые стараются выяснить, каким способом можно увеличить шансы оказаться в числе этих 20%. Пока не существует магической формулы, однако есть два правила, которые несколько отличаются от общепринятых стандартов поддержания крепкого здоровья. Оказывается, на стареющий мозг благотворно влияют:

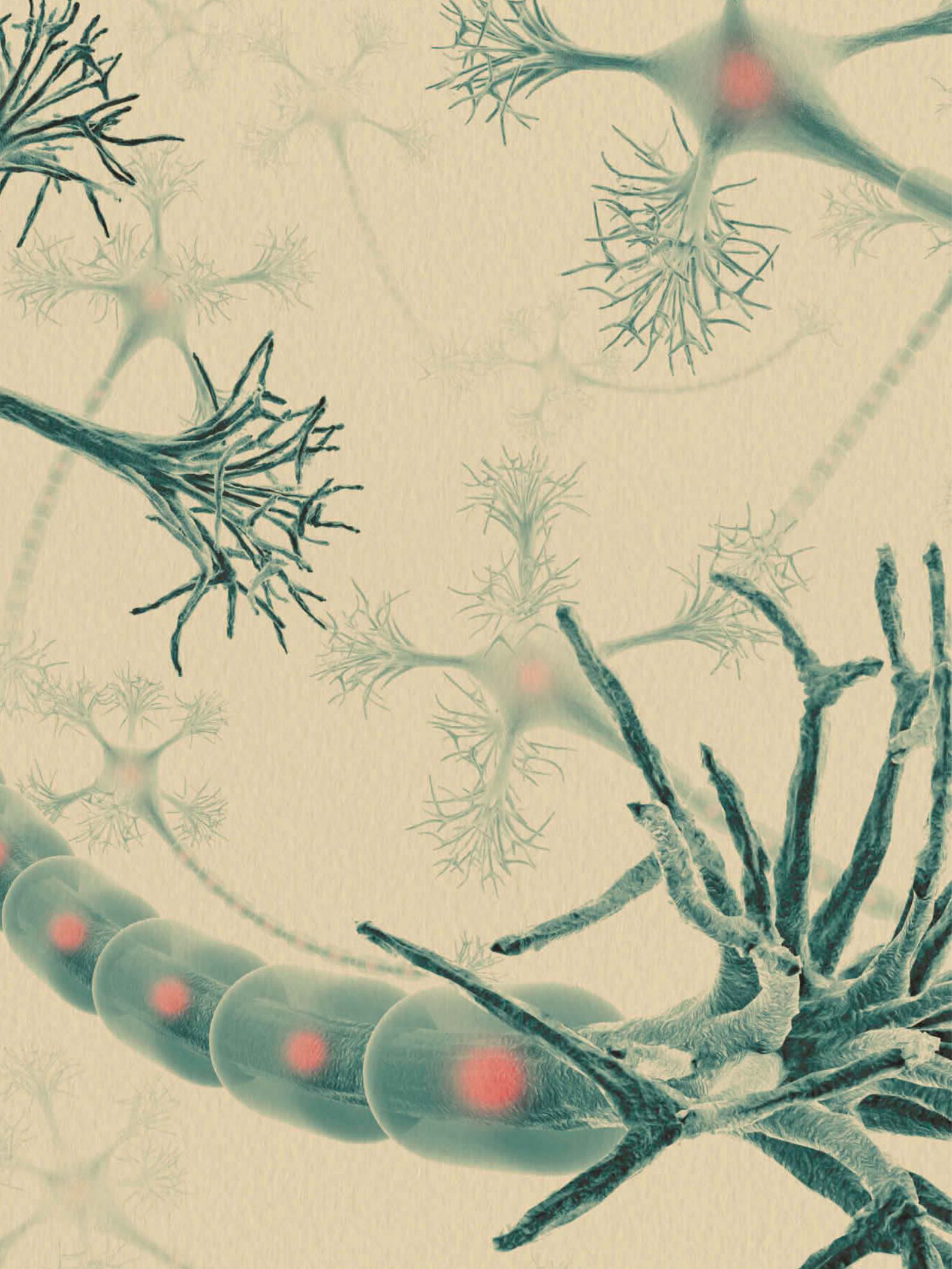
- поддержание социальных связей, а также
- систематическое выполнение упражнений — как физических, так и развивающих мыслительные процессы.

Недавнее исследование установило, что активный отдых улучшает кровообращение. Так что гуляйте больше!









Глава 4

ОСОБАЯ КЛЕТКА

Что мы знаем о нейронах

Типичный биполярный нейрон — простейший тип нейронов

Давайте попробуем приблизить структуру головного мозга до нейронного уровня. Мы обнаружим, что этот объект исследования нейробиологии поражает простого обывателя своей многогранностью. Мозг — поистине сложный механизм, ведь каждую его клетку можно по праву назвать самостоятельным мини-мозгом! Чтобы понять, по какому принципу он работает, необходимо спуститься еще ниже — до молекулярного уровня, где стираются границы между биологией, химией и физикой. Мы разберем некоторые явления на этом уровне, прежде чем снова уменьшить масштаб.

Начнем с рассмотрения самых основ. *Нейрон* — клетка, которая может отправлять и получать сигналы по нейронной сети. *Биполярный нейрон* — самый простой представитель из всей классификации нейронов, который наиболее часто встречается в сенсорной системе. У биполярного нейрона имеются два «кабеля»: входной — *дендрит*, принимающий сигналы от сенсорных органов на одном конце, и выходной — *аксон*, действующий на другом конце.

Активные нейроны отправляют электрические импульсы вниз по аксону. Чем больше активность клетки, тем чаще следуют друг за другом импульсы. Увеличение исходной частоты и, возможно, характер импульсов регистрируются в следующей клетке. Возбужденный нейрон может посылать импульсы до тысячи раз в секунду вместо привычного одного раза в секунду. Импульс (вспышка) направляется через синапсы на дендриты соседних нейронов.

Нейроны общаются через синапсы, которые выступают связующими звеньями между аксоном одной клетки и (чаще всего) дендритом другой

Если рассматривать биполярный нейрон изолированно, он имеет принимающий и передающий отростки (вход и выход). Говоря современным языком, нейрон обрабатывает информацию. Входная информация в большинстве случаев поступает от множества других нейронов. Некоторые нейроны передают по аксону сигналы, тормозящие соседние нейроны (ингибиторные сигналы), а некоторые — наоборот, запускающие (возбуждающие сигналы). В конечном итоге все эти сигналы суммируются принимающим нейроном, которому приходится «решать», испускать ли ему больше импульсов. Как сказал однажды Фрэнсис Крик, «один нейрон передает другому главным образом информацию о том, насколько сильно он возбужден». Но как именно это происходит? И как принимается решение?

Клетка, молекула, атом

По функциональности нейроны кардинально отличаются от других клеток, и вся теоретическая база нейробиологии берет свое начало от этих прекрасных «лучиков жизни». Подробные рисунки нейронов Сантьяго Рамона-и-

Кахаля (подробнее см. «Открытие нейронов»), созданные в прошлом столетии, лишь намекают на их особые качества. Многие отличительные характеристики скрыты от глаз на молекулярном уровне.

ДНК — знаменитая двойная спираль, одна из самых больших клеточных молекул

Для того чтобы составить целостное представление о деятельности головного мозга, следует погрузиться в изучение более глубоких слоев его организации. Чтобы понять нейронные взаимодействия, нет необходимости опускаться в самый низ — до микромира, где господствуют квантово-механические эффекты (хотя английский физик и математик Роджер Пенроуз волен с этим не согласиться — см. параграф «Трудная проблема»). Но разобраться в явлениях, связанных с молекулами и атомами, необходимо.

Каждая клетка состоит из множества молекул. Упростим классификацию в соответствии с постулатами современной молекулярной биологии. Грубо говоря, существуют большие и малые молекулы. Большие молекулы, иногда достигающие поистине огромных размеров, — это белки, выполняющие разнообразные функции. Они образуются из малых молекул, соединенных друг с другом в порядке, указанном в еще одной крупной молекуле — *ДНК*. Некоторые другие большие молекулы участвуют в создании белков в нейронах, как и в других клетках.

В основе белков лежит уникальная последовательность аминокислот — первичная структура, которая в итоге сворачивается в трехмерную структуру. Все самые важные процессы в клетке зависят от того, как эти структуры взаимодействуют с другими молекулами. Это может быть другая большая молекула, придающая первой особый молекулярный толчок или способствующая образованию более крупной структуры, а может быть одна из малых молекул.

Внутри клетки молекулы беспорядочно сталкиваются, иногда находя подходящего компаньона

Иногда малые молекулы изменяются под воздействием молекул белка — белок здесь выступает в качестве *фермента*, катализирующего химические реакции. Порой происходит обратный процесс, когда сворачивание третичной структуры белка слегка меняется под действием соответствующей молекулы. В этом случае белок, вероятно, является компонентом сигнальной системы. Особенно «умные» белки могут выполнять сразу обе функции.

Представьте эти процессы в виде огромного набора перемешанных замков и ключей, беспрестанно врезающихся друг в друга на скорости. Молекула выполняет свою работу, и ее совершенно не волнует, гормон это или нейротрансмиттер, фермент, часть клеточной мембраны или вторичный посредник. Каким-то образом нейроны способствуют нужным молекулярным столкновениям для выполнения своей особой работы. Многое из этого зависит от особой составляющей клетки — *мембраны*.

Природный дуализм

Клетки используют мембраны, чтобы организовать внутреннее пространство и установить свои собственные внешние границы. Наружная мембрана нейронов наделена уникальными свойствами, для изучения которых следует снова обратиться к молекулярной биологии. Мембрана представляет собой двойной слой липидных молекул, окружающий всю клетку: тело, аксон, дендриты и все остальное. У этих особенных молекул, составляющих мембрану, есть ***гидрофильные головки***, обращенные к среде внутри и снаружи клетки, и ***гидрофобные концы***, обращенные внутрь мембраны.

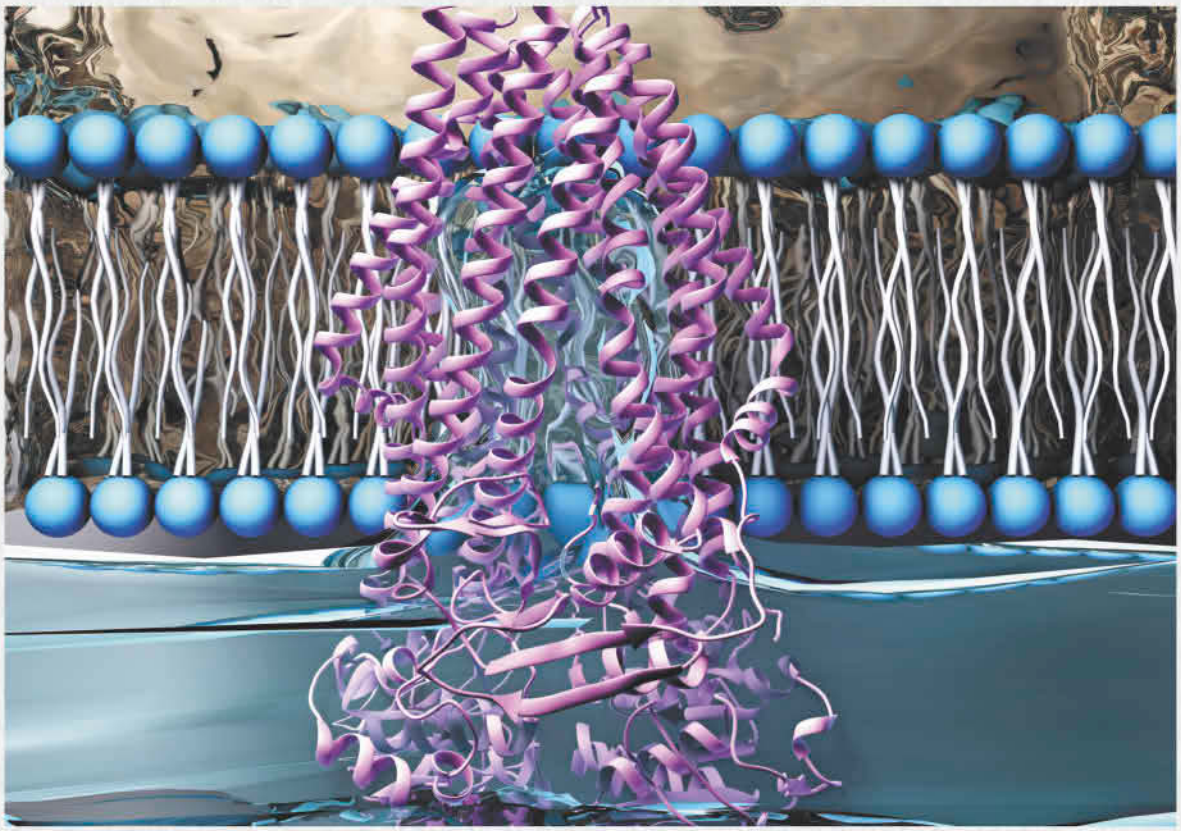
Хоть мембрана и невероятно тонкая, у нее есть четко определенные регионы, служащие ориентиром для белков внутри нее, которые всегда найдут свой путь наверх. Ее структура пребывает в полужидком состоянии с «плавающими» в мембранном слое особыми белками.

Все клеточные мембраны имеют схожее строение. Клеточная оболочка выступает не только в роли пассивного барьера, но и, благодаря белкам, в роли регулятора обмена веществ между клеткой и окружающей средой. Мембранные белки нейронов регулируют транспортировку различных молекул особенно «вдумчиво».

В мембране нейрона находятся разнообразные транспортные белки. Исследователям удалось выявить структуры основных их типов.

Клеточная мембрана нейрона содержит *поры* и *насосы* для физического транспорта. Молекула или группа молекул белка формирует в мембране поры, через которые могут перемещаться небольшие молекулы. Некоторые поры характеризуются высокой селективностью — открывают путь, скажем, только определенным ионам. Некоторые из

На этой модели молекулы белка показана структура ее основной цепи, которая перемещает ионы или малые молекулы сквозь клеточную мембрану. Множество шариков на изображении — это гидрофильные головки липидных молекул, образующих двухслойную мембрану



них работают только в одном направлении. Другие — могут открываться и закрываться. В насосах же белки могут «выкачивать» те или иные молекулы наружу или внутрь клетки, поддерживая разность их концентрации внутри и снаружи мембраны.

Также можно выделить транспорт информации: белок, выступающий над поверхностью клетки, захватывает небольшую молекулу, находящуюся в пределах досягаемости, в результате чего происходит трансформация структуры белка по всей длине, в том числе и той его части, что находится внутри клетки. Физически внутрь клетки ничего не проникло, но белок-рецептор зарегистрировал химический сигнал снаружи и передал информацию о нем внутрь.

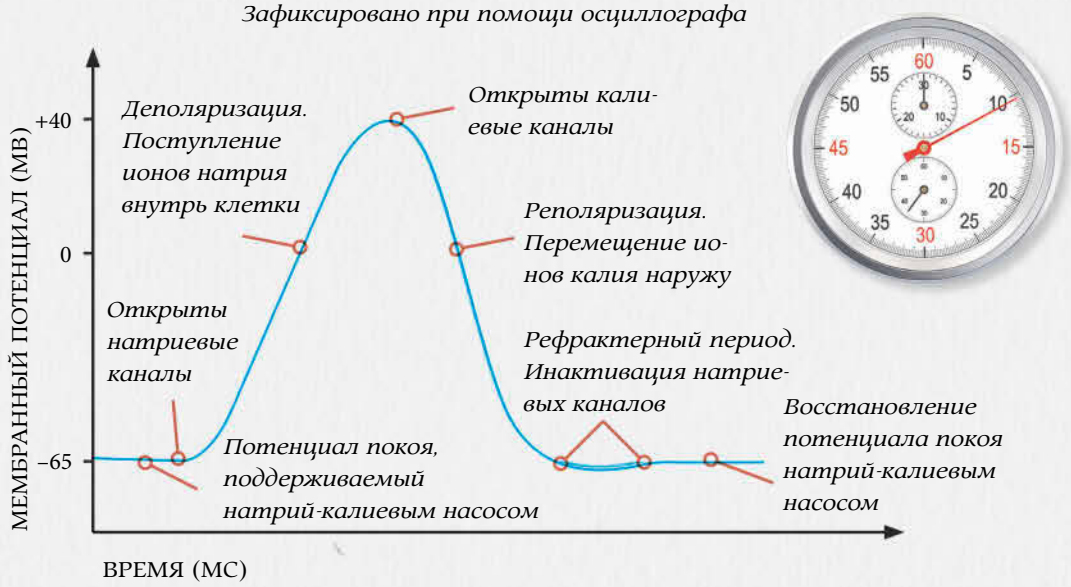
Нервный импульс

В СОСТОЯНИИ ВОЗБУЖДЕНИЯ НЕЙРОН ОТПРАВЛЯЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СИГНАЛ ВНИЗ ПО АКСОНУ. Этот процесс отличен от движения электронов по проводнику. Импульс — это изменение напряжения (или потенциала) мембраны, проходящее вдоль аксона, которое передается дальше с помощью активности специальных белков.

О деятельности нейронов удалось узнать еще до их обнаружения: Алан Ходжкин и Эндрю Хаксли построили график работы нервного импульса, регистрируя электрическую пульсацию внутри аксона кальмара (подробнее см. параграф «Постижение смысла»). В состоянии покоя наружная поверхность клеточной мембраны положительно заряжена по сравнению с отрицательно заряженной внутренней стороной. Это создает разность потенциалов, измеряемую в милливольтах (мВ).

Если слегка уменьшить эту разницу зарядов рядом с одним концом аксона, ничего не произойдет; при более сильном вмешательстве нейрон высвобождает импульс, в результате чего наружная поверхность становится заряженной отрицательно, а внутренняя — положитель-

ГРАФИК ПОТЕНЦИАЛА ДЕЙСТВИЯ
Зафиксировано при помощи осциллографа



но. Затем концентрация зарядов меняется по разные стороны мембраны до тех пор, пока снова не достигается потенциал покоя.

Регистрация величины потенциала у кальмара показала, что эти изменения сопровождались перераспределением положительно заряженных ионов с одной стороны мембраны на другую: ионы натрия устремлялись внутрь клетки, в то время как ионы калия покидали ее.

Алан Ходжкин и Эндрю Хаксли предположили, что в мембране есть особые ионные каналы, способные открываться и закрываться. Спустя полвека ученые обнаружили эти каналы: выяснилось, что определенные белковые молекулы реагируют на изменения мембранного потенциала и проявляют активность. Возвратно-поступательное изменение потенциала запускается в начале аксона и затем движется по нему. Отдельные белки образуют ионные насосы для поддержания потенциала покоя.

Весь процесс представляет собой небольшую электрическую встряску, сравнимую с ударом хлыста или искрами бенгальского огня. Процесс возбуждения можно коротко обозначить *потенциалом действия*. Он длится всего 1 мс, и спустя доли секунды нейрон может снова выпустить импульс.

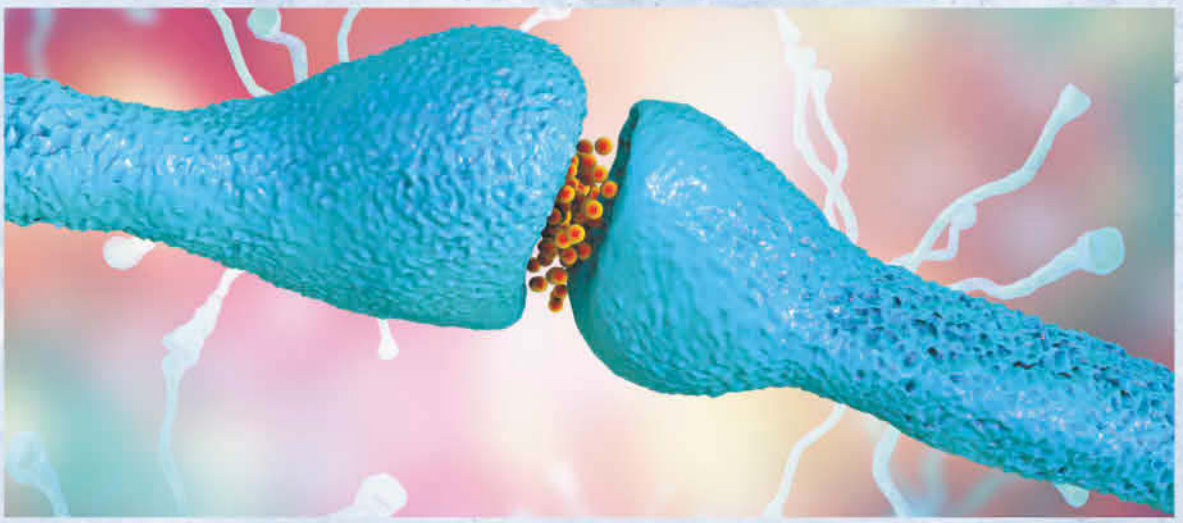
Конец линии — синапс

Передача импульса осуществляется электрическим способом, а затем при помощи химических соединений, проникающих через синаптическую щель

Как мы упоминали ранее, аксон может быть абсолютно любой длины, например коротким и соединять два нейрона одной части головного мозга, а может тянуться от ствола головного мозга до кончиков пальцев ног и составлять протяженность 2 м у человека. У кита подобные нервные волокна и вовсе достигают 25 м и даже способны удлиняться до 3 см в день.

Какой бы ни была длина аксона, на стыке с другой клеткой он прерывается. Нервный импульс затухает, но сигнал продолжает свой путь через синапс.

Аксон (или его ветвь) прерывается на небольшом расстоянии от специализированной области мембраны соседней клетки, располо-



ЖИДКОСТЬ ИЛИ СИГНАЛЫ?

Обнаружение синаптической щели под электрическим микроскопом положило конец великому разногласию в мире нейробиологии, берущему свое начало с противоречия между Сантьяго Рамоном-и-Кахалем и Камилло Гольджи о том, является ли нейрон обособленной единицей или частью непрерывной сети.

Чуть позже был улажен сопутствующий спор о передаче сигналов от нейрона к нейрону. Когда впервые был зарегистрирован потенциал действия, теория передачи сигналов электрическим путем плотно укоренилась в научном мире, но сторонники гипотезы химической передачи не сдавались, пока в 1921 году не произошло открытие, доказавшее, что головной мозг работает весьма таинственным образом.

Австрийский ученый Отто Лёви изолировал бьющееся сердце лягушки и стимулировал нерв, замедлявший его ритм. Затем он попытался претворить в жизнь пришедшую ему во сне идею: ночью он спросонья кое-как набросал заметку, но утром не смог разобрать собственные записи. Следующей ночью ученого вновь озарило, и на этот раз ему удалось доходчиво изложить свои мысли. Сможет ли омывающая одно сердце жидкость замедлить другое? Если да, значит в растворе содержится какое-то вещество, влияющее на это.

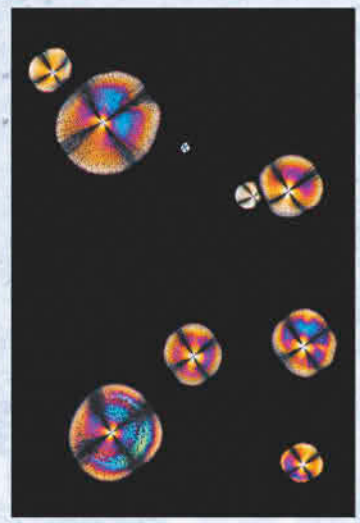
Таким образом ученому удалось распознать первый нейротрансмиттер — *ацетилхолин*.

Отто Лёви

женной на дендрите, дендритном шипике или иногда на теле клетки. Импульс, проходящий по аксону, вызывает выделение химического вещества — нейротрансмиттера, — которое упаковано в маленькие пузырьки в специальном утолщении на кончике аксона. Нейротрансмиттер быстро проникает через пространство между клетками, составляющее примерно 20 нанометров (нм; 10^{-9} м), и распознается рецепторными белками на постсинаптической мембране. Так электрический сигнал преобразуется в химическую реакцию.

Один потенциал действия — много результатов

Кристаллы чистого глутамата



В биологии не обойтись без исключений из правил. Так, существуют аксональные соединения без химических синапсов, где электрические сигналы переходят от одной клетки к другой напрямую через так называемые ***щелевые контакты***. Но подавляющее большинство соединений избегают этого аккуратного и эффективного устройства. По какой причине?

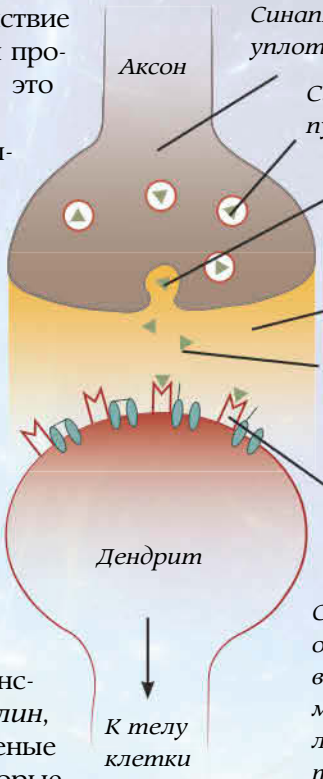
Все, что нейрон способен делать с электрическим сигналом, — это периодически отправлять его. Но благодаря изменениям в химических синапсах потенциал действия может направлять множество различных сигналов.

Современная нейробиология составила большую классификацию нейротрансмиттеров. Некоторые воздействуют на один из множества различных рецепторов, связанных с ионными каналами. Если канал открыт и пропускает положительно заряженные ионы в постсинаптический нейрон, нейрон при-

ближается к высвобождению импульса — это действие *возбуждающих нейротрансмиттеров*. Если канал пропускает внутрь отрицательно заряженные ионы, это действие *тормозящих нейротрансмиттеров*.

Глутамат относится к аминокислотам и является наиболее часто встречающимся возбуждающим нейротрансмиттером. Представителями тормозящих нейротрансмиттеров выступают другие аминокислоты: *γ-аминомасляная кислота* (*ГАМК*) и *глицин*.

Более сложные эффекты достигаются посредством других рецепторов, распознающих нейротрансмиттеры, что преобразует их форму и вызывает дальнейшие изменения внутри принимающего нейрона. Некоторые из них связаны в причинно-следственные цепочки, способные контролировать многие явления внутри клетки: активацию ферментов, влияние на экспрессию генов и др. Основной класс связан с белком, известным как *G-белок*. Различные рецепторы, сопряженные с G-белком, реагируют на нейротрансмиттеры, которые являются аминами: *ацетилхолин*, *дофамин* и несколько других. Совсем недавно ученые выделили третий класс нейротрансмиттеров, которые представляют собой более крупные пептидные молекулы; сейчас насчитывают как минимум около 100 различных видов.

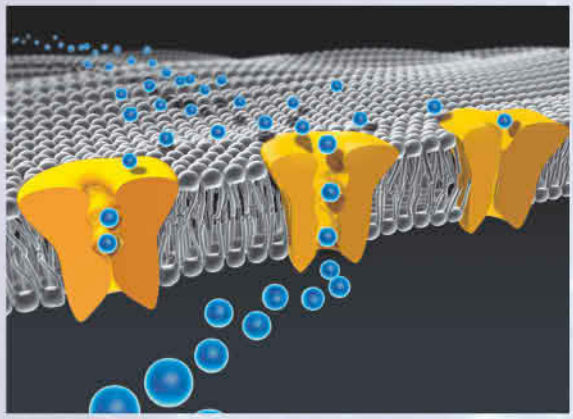


Синапсы имеют одинаковое базовое строение, множество различных нейротрансмиттеров и еще большее число рецепторов в дендритной мембране

Таким образом, для точной настройки сигнала каждому синапсу предоставляется возможность использовать огромное количество вспомогательных деталей.

Многообразие классов синапсов является наиболее ярким примером основной особенности нейронов. Они работают по-разному, потому что расположение белков в мембранах нейронов может чрезвычайно разниться как от клетки к клетке, так и в областях одной клетки. А синапс, как и нейрон, можно регулировать почти бесконечно. Как поясняется в гл. 7, это позволяет развивать наши теории памяти и обучения.

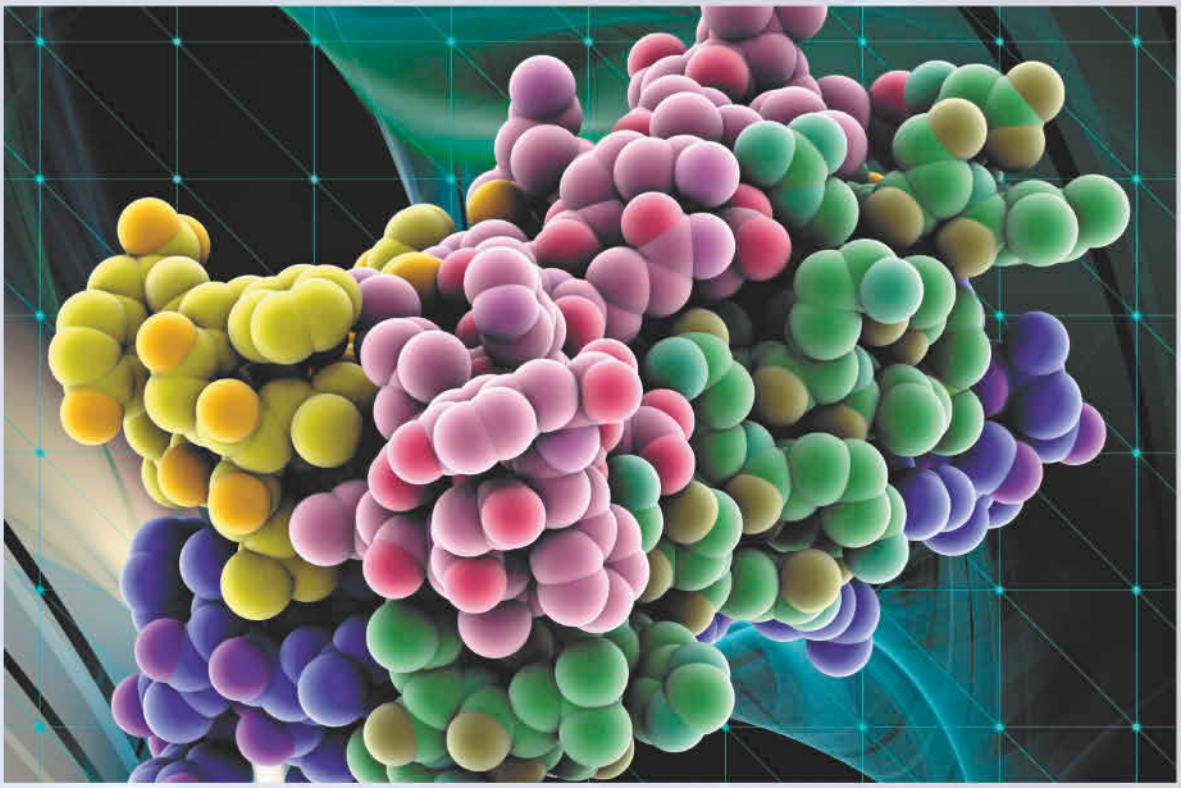
Сравнение синапсов



Ионные каналы в клеточных мембранах помогают контролировать внутриклеточное давление

Только чудо могло способствовать возникновению системы насосов и пор в один и тот же временной отрезок. Некоторые молекулярные механизмы использовались задолго до появления нейронов или синапсов.

Так, потенциал действия находится в зависимости от белков, известных как *потенциалзависимые ионные каналы*. Поры, пронизывающие мембрану клетки, открываются при изменении потенциала напряжения между наружной и внутренней сторонами мембраны. Современные бактерии обладают белка-



Представленная модель части калиевого канала соединяет четыре одинаковых кусочка, между которыми находятся поры, образуя молекулярный проход для ионов калия

ми, наделенными подобными функциями, поскольку клетки всегда нуждаются в системе регуляции потоков ионов. Без нее клетка с повышенной концентрацией ионов переполняется водой и взрывается.

Сравнение белковых последовательностей позволяет сделать качественные предположения о некоторых эволюционных отношениях. Так, по всей вероятности, первый ионный канал предназначался специально для ионов калия. Дупликация его генов сделала возможными дальнейшие мутации, способствующие лучшей адаптации каналов под натрий и кальций. Недавние исследования позволили биохимикам изучить все белки в представленном образце. Анализ *постсинаптического уплотнения* (*ПСУ*) — области, которая примыкает к мембране принимающей клетки, — отразил всю сложность строения синапсов.

При изучении электронных микрофотографий вплоть до 1970-х годов эту область именовали просто «каплей». И хотя ее полная структура до сих пор не установлена, мы знаем, что, например, в ПСУ мыши содержится более 1100 различных видов белка. Некоторые из них поддерживают форму клетки, другие представлены каналами, рецепторами, ферментами, сигнальными молекулами и белками, участвующими в транспорте других молекул. Очевидно, требуется немало усилий, чтобы управлять движением сигнала через синапс.

Образование столь замысловатой структуры происходит поэтапно. Существует интересная гипотеза, что с усложнением головного мозга усложняется строение синапсов и ПСУ.

Показано, что у мыши вспомогательные механизмы синапса более развиты, нежели у дрозофилы. Вероятно, эволюция нашего мозга охватывает не только увеличение размеров коры головного мозга, но и другие, более тонкие изменения. Мы можем предположить, что изменения в синаптических белках приводят к появлению новых видов нейронов в более сложных сетях.

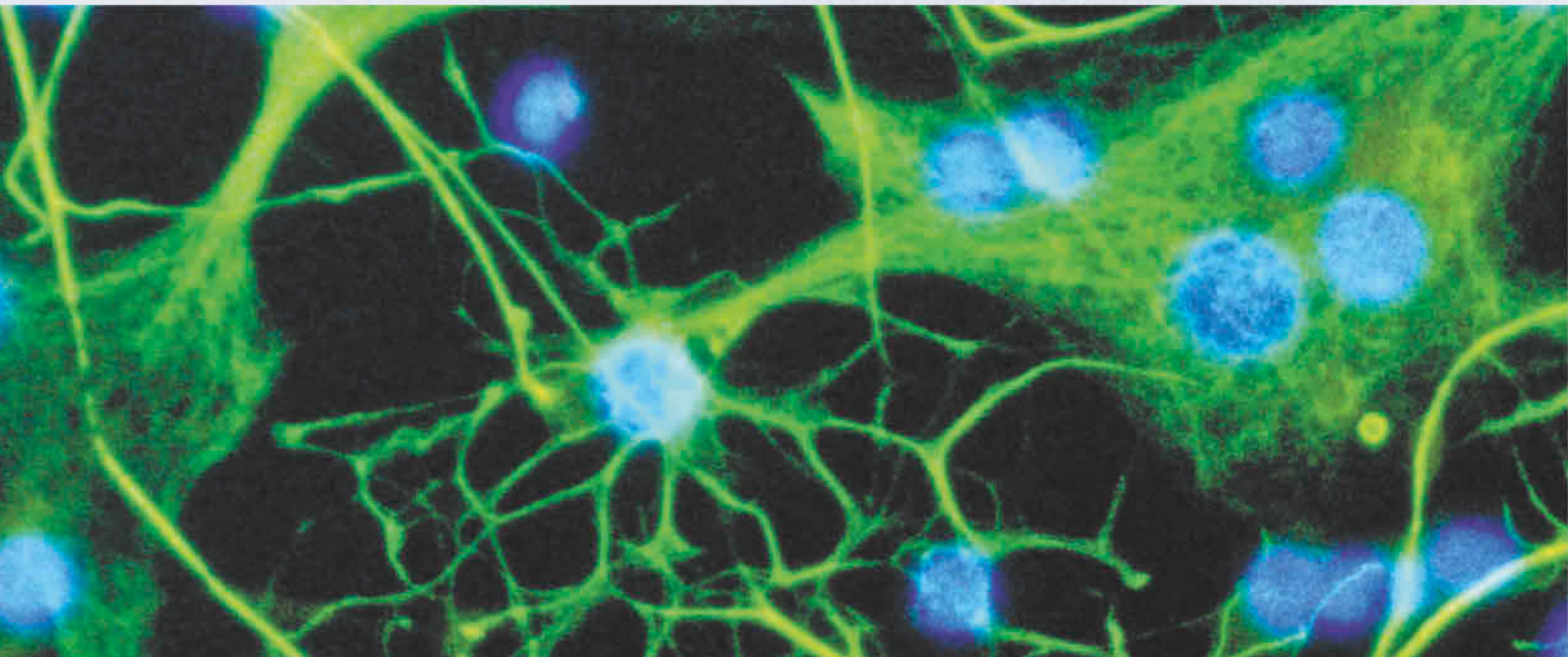
Многократное воздействие — один результат

Синапсы служат напоминанием о том, что нейроны устанавливают множество связей с другими клетками. Итак, давайте вновь рассмотрим нейрон как часть огромной сети, поскольку только целостная картина позволяет раскрыть все изобилие тонкостей.

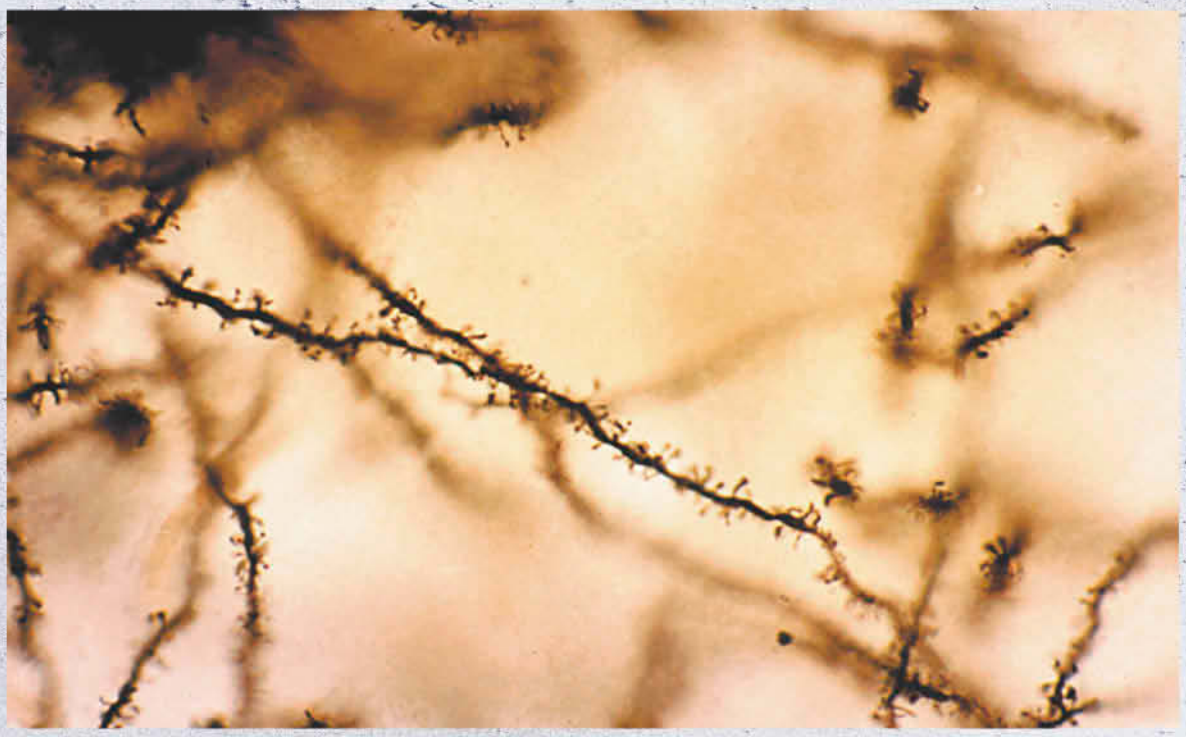
Эти тонкости касаются поиска ответа на один вопрос: откуда нейрон знает, когда выпускать импульс? Аксон генерирует потенциал действия в ответ на входные данные с синапсов. Можно добиться такого же эффекта, если ввести внутрь клетки электрод. Некоторые связанные с входными и выходными данными процессы понятны; а вот как нейроны внутри живого мозга обрабатывают сменяющие друг друга тормозящие и возбуждающие входные сигналы для получения результата — по-прежнему остается загадкой. Есть основание предполагать, что нейрон просчитывает свои действия исходя из суммы всех сигналов на входе и таким образом обрабатывает информацию. Данная метафора, конечно, выглядит привлекательной, однако в ней нет ни намека на то, как же все происходит.

Удалось установить, что существует множество путей оценки информации на входе (модуляции синаптических сигналов). Вот несколько из них.

Первостепенной важностью обладает та информация, которая поступает непосредственно от нейротрансмиттеров, воздействующих на ионные каналы. Возбуждающий потенциал открывает натриевые каналы, перемещая положительный заряд вдоль мембраны и подталкивая клетку ближе к пороговому напряжению для выброса импульса. Тормозящий потенциал открывает каналы для отрицательно заряженных ионов хлора, оказывая противоположный эффект. Нейротрансмиттеры, воздействующие на эти ионные каналы, работают с высокой скоростью.



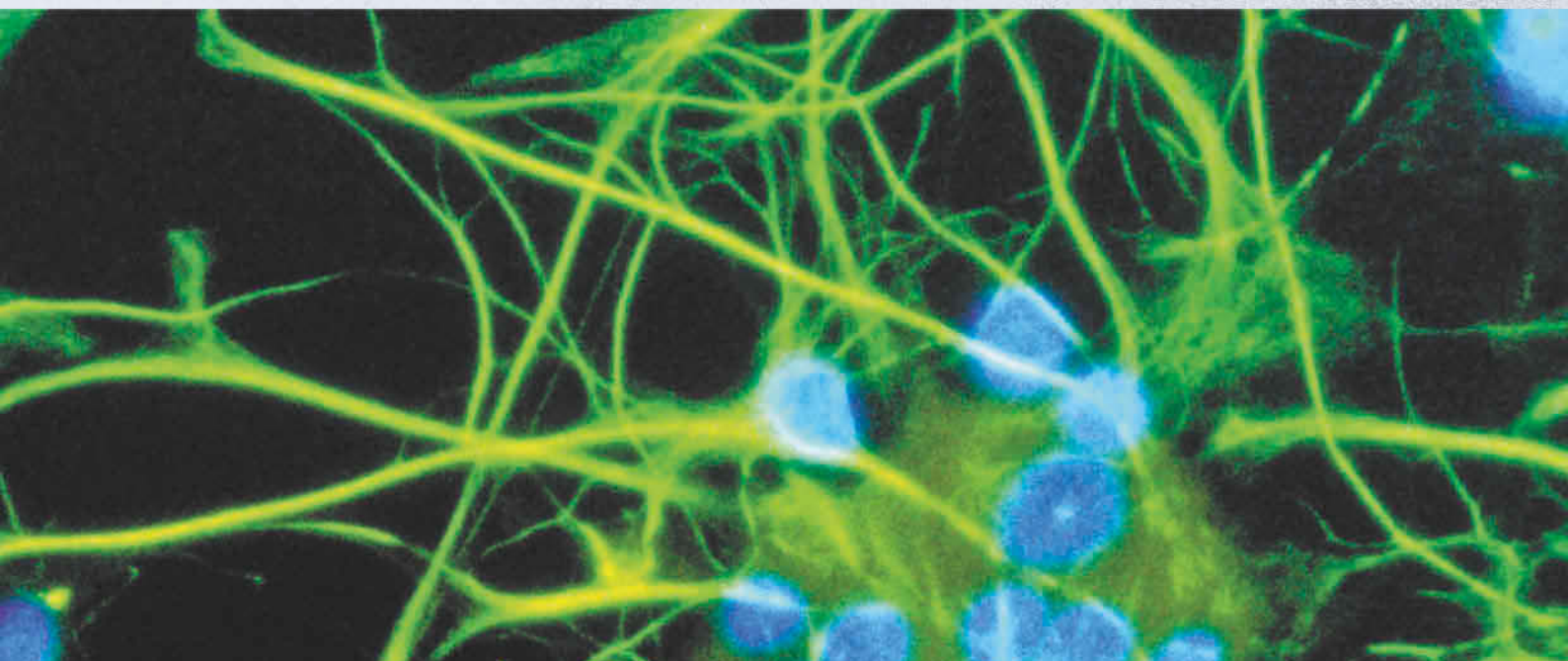
Глиальные клетки, известные как астроциты, играют важную роль в модуляции синапсов



Дендриты коры головного мозга значительно различаются по своей конфигурации и реакции на поступающие от синапсов сигналы

Далее происходит модуляция. Белковые рецепторы, высвобождающие химические переносчики информации в клетке, могут оказывать разное влияние: одни задействуют ионные каналы, другие воздействуют на ферменты и даже гены. Любое из перечисленных изменений способно сделать клетку более или менее возбудимой.

Другой еще не до конца изученный вид модуляции исходит от дендритов. Дендриты могут быть относительно простыми проводниками входных синаптических импульсов, однако многие нейроны обладают более сложными дендритами со своей специализированной системой ионзависимых каналов. Некоторые из них могут запускать едва ощутимые электрические сигналы. Оба вида могут активировать нейрон или же затормозить его. В конечный результат вносят свой электрический и химический вклад *астроциты* — самый распространенный класс глиальных клеток.

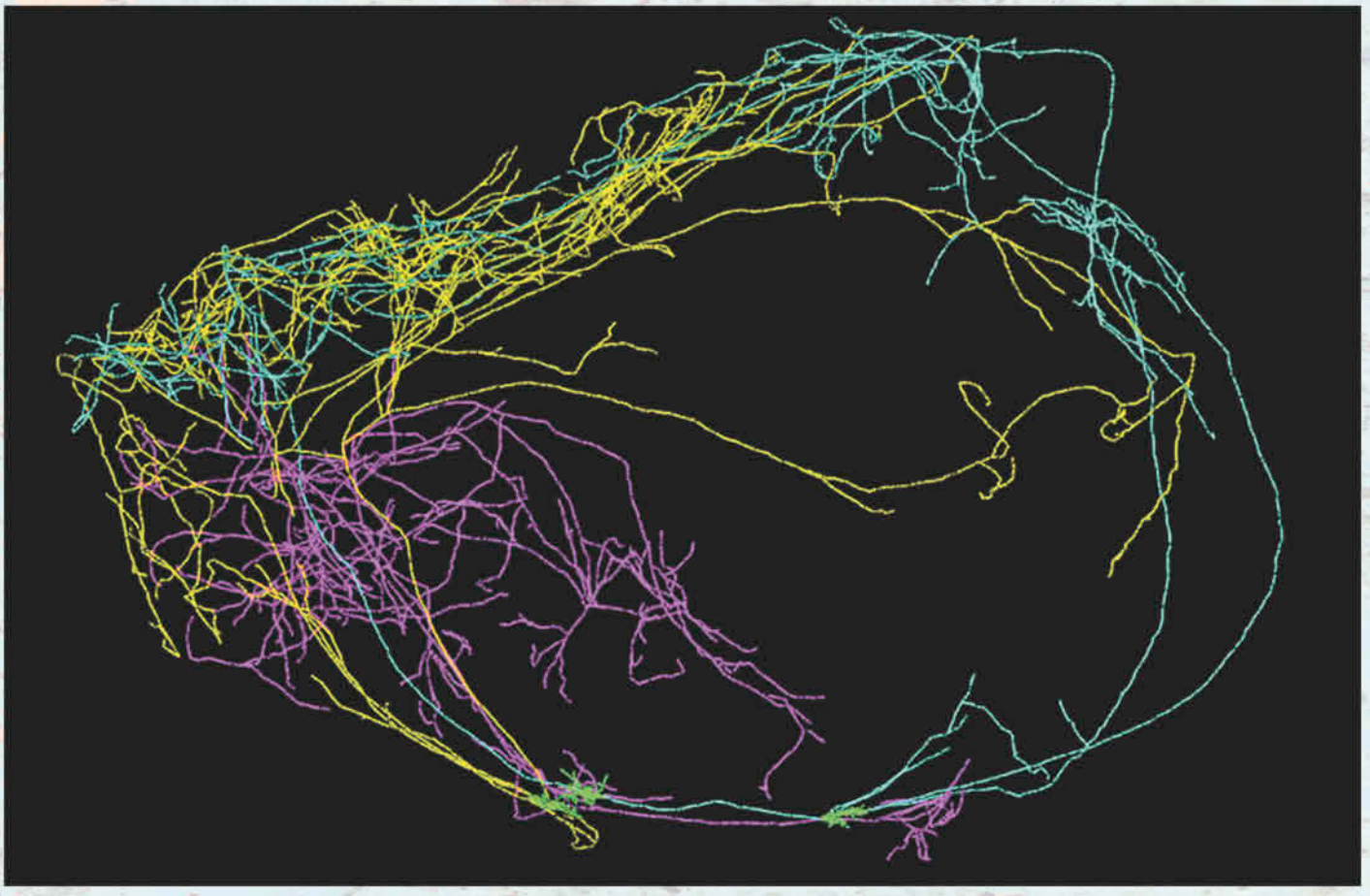


Область воздействия нейронов

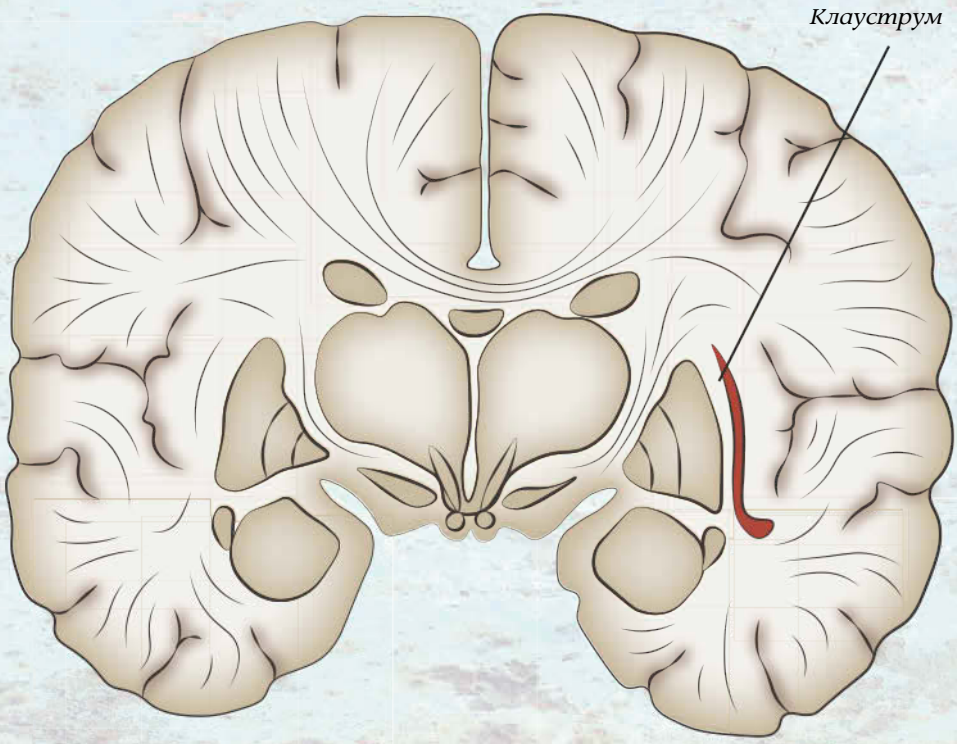
Нейрон — крошечная клетка, одна из миллиарда таких же клеток, подающих электрические сигналы. Но у каждого нейрона имеется своя область воздействия — необыкновенная сеть.

Аксон может обладать протяженностью от ствола головного мозга до кончиков ног, при этом, что важно, создавая бесчисленное множество связей. Эта величина постоянно колеблется, поскольку посчитать такое огромное количество клеток — невероятно сложная задача, не говоря уже о подсчете синапсов. Некоторые нейроны создают всего несколько связей, в то время как обильно разветвляющиеся дендриты *клеток Пуркинье* могут образовывать около 100 000 синапсов. Общее количество синапсов, вероятно, измеряется в триллионах. Обильное сокращение избыточных синапсов в ходе развития не означает, что изначально эти связи были установлены случайно: контролируется направление роста аксонов, прослеживается место и время прироста ветвей и шипиков дендритов, которые все еще интенсивно исследуются.

Предположим, что среднее количество клеток, с которыми соединяется типичный нейрон, равно 10 000. А теперь представим,



Цифровая реконструкция «тернового венца», соединения которого охватывают весь головной мозг мыши, в результате микроскопии с применением флуоресцентного белка



что каждый из 10 000 присоединенных к первой клетке нейронов связывается с 10 000 других (иногда ветки аксона тянутся обратно и образуют синапсы со своей клеткой, но это случается не так часто, чтобы повлиять на общее количество). Если не брать в расчет случаи пересечения, то в данный момент соединено 100 млн клеток. Если каждая из этих клеток, в свою очередь, создаст 10 000 соединений, у нас уже будет показатель, который в 10 раз превысит количество нейронов среднестатистического человека, — 100 млрд.

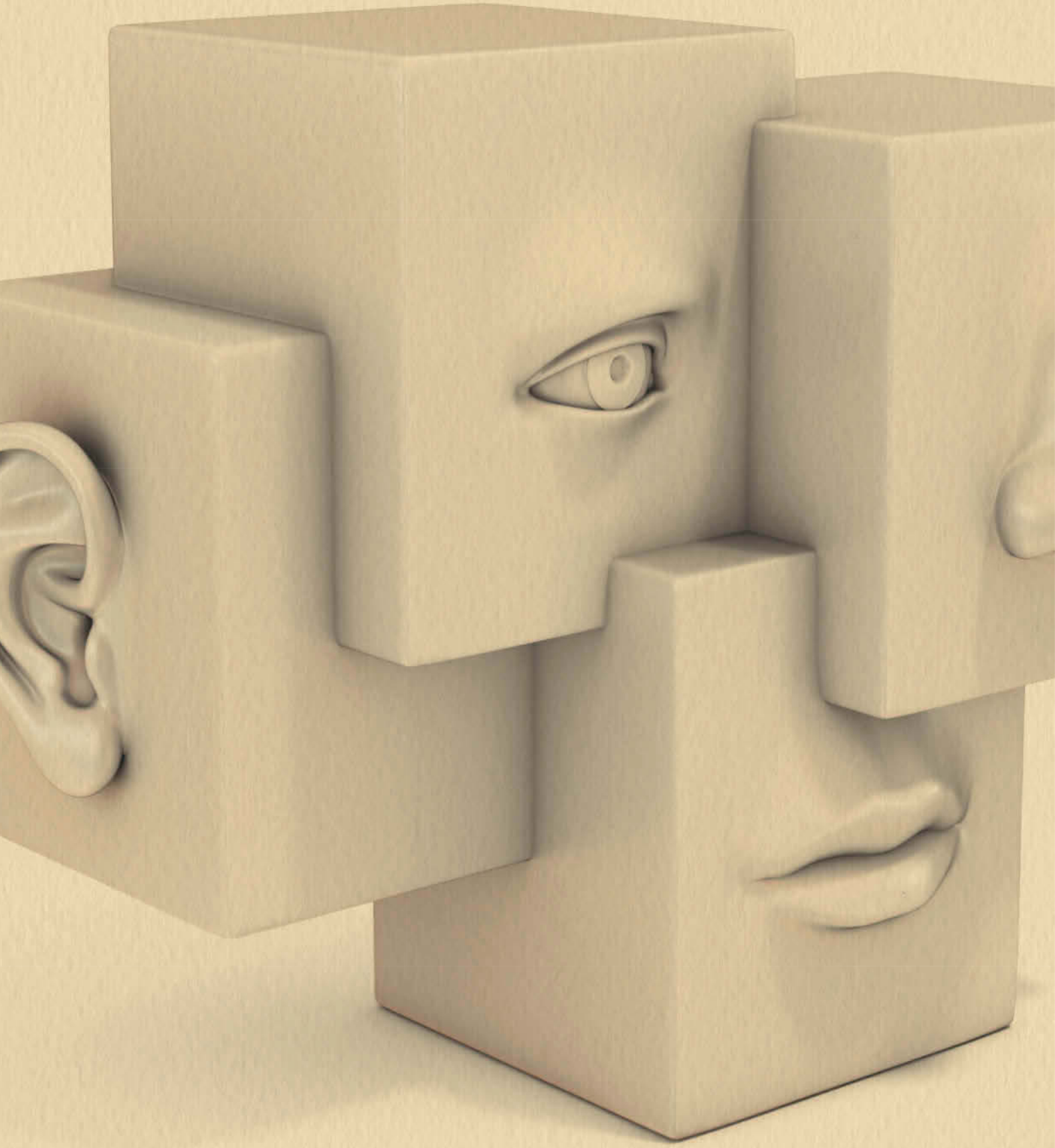
Это рассуждение имеет прогностический характер, в реальности мозг устроен иначе. Однако способность нейронов создавать сети означает, что любая клетка находится в шаге от доступа ко всему мозгу. Исследователям стоит учитывать всю силу соединений.

ПОТЕРЯННАЯ СВЯЗЬ?

Каждому нейрону необходимы как далекие, так и близкие связи для выполнения отведенных ему задач. В мозге млекопитающих, например мышей, есть нейрон, нервные волокна которого способны устанавливать связь со всем мозгом.

Клетка, о которой идет речь, является одной из трех клеток, соединения которых были отображены на карте и представлены на научной конференции 2017 года. Нейронные сети этой троицы охватывают необычные области мозга двух полушарий. Траектория соединений «тернового венца» — именно такое название получила одна из клеток — огибает весь мозг.

Эта скрупулезная работа по визуализации нервных путей была проведена в Институте Аллена по изучению мозга в США. Директор института Кристоф Кох указал, что эти нейроны находятся в области под названием клауструм, которая, по его мнению, служит источником сознания (подробнее см. гл. 11). Сам по себе этот разветвленный нейрон может и не являться ключом к сознательному «я» у мыши или человека, однако он играет роль в интеграции информации со всех отделов мозга.



Глава 5

ЧТО ПРОИСХОДИТ?

Основанные на чувствах

Согласно мнению британского физиолога Джона Закари Янга, восприятие — это «поиск информации, необходимой для жизни». Наш мозг получает информацию из окружающего мира с помощью органов чувств: зрения, слуха, обоняния, осязания и вкуса. Вкусовые ощущения и запахи помогают нам почувствовать физические характеристики, свойственные тем или иным молекулам, — этой способностью наделены даже самые простые бактерии. Мы можем слышать звуки, т. е. ощущать вибрацию колеблющегося вокруг нас воздуха. Зрительная система нашего организма распознает фотоны. Мы можем ощущать давление и силу через прикосновения к коже или по внутреннему состоянию тела и движениям.

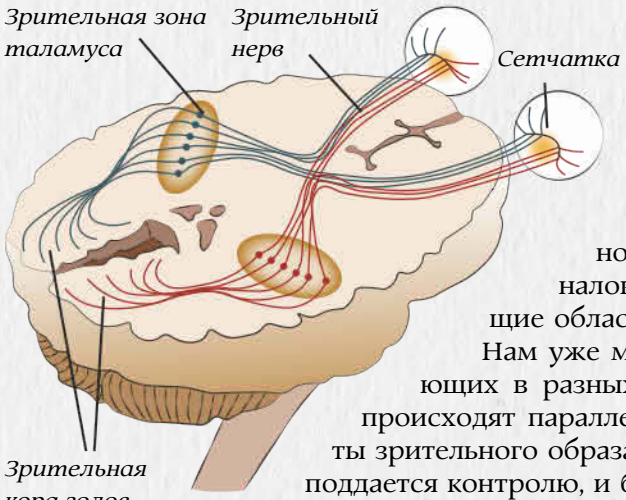
Все ощущения зависят от специализированных клеток, напрямую фиксирующих поступающую информацию. Они тем или иным образом меняют электрическую разность потенциалов и вызывают импульс в сенсорном нейроне. Как следствие, каждое ощущение кодирует поступающую информацию — электрический вход.

Казалось бы, с этой частью вроде все понятно, но основная сложность заключается в том, чтобы отследить, как сети обрабатывают входную сенсорную информацию. Каждый сигнал вносит вклад в представление мозга об окружающем мире. Приведем пример, часто фигурирующий в дискуссиях о сознании: то, что мы видим, воспринимается непосредственно доступным отражением того, что существует в действительности. На самом же деле это конструкт, сгенерированный после нескольких этапов сложной обработки огромного количества информации извне. Конечным продуктом является рабочая гипотеза. Зачастую истинность гипотезы определяется соответствием наших действий относительно нее. С эволюцией органов чувств и развитием способности быстро передавать информацию увеличилась вероятность выживания, так что всегда существует некая цена точности оценки реальности. Однако восприятие, каким бы точным оно ни было, все равно носит гипотетический характер.

На основе рабочих гипотез наш мозг выстраивает тщательно продуманный план действий. Однако сперва ему нужно собрать информацию о том, на что нужно будет реагировать.

Длинный путь к зрительному образу

Во время чтения создается впечатление, что внутри глаз есть фиксированная точка, откуда открывается хороший обзор на все слова и предложения в книге. Нейробиология раскрывает этот вопрос с другой стороны. В головном мозге (***пока что***) не удалось обнаружить определенное место, отвечающее за проектирование изображения. Все поступающие через глаза сигналы подвергаются целому ряду трансформаций.



Некоторые главные нервные пути, соединяющие глаза с мозгом

Представим на мгновение, что глаз — это сканер для генерации потока информации. Попадающий в поле зрения луч преобразуется в аксонах в электрические импульсы. Обработка информации происходит в несколько этапов, на каждом из них образуется новая последовательность нейронных сигналов, которые затем передаются в следующие области зрительной системы.

Нам уже многое известно об этих этапах, протекающих в разных областях головного мозга. Некоторые происходят параллельно и изолируют определенные аспекты зрительного образа. Входная зрительная информация легко поддается контролю, и большинство исследований привязывают конкретные входы для регистрации сигналов к отдельным нейронам, в основном у кошек и обезьян.

Процесс преобразования зрительных раздражителей в образ начинается в сетчатке, которая передает по зрительным нервам первичные результаты обработки из задней части глаза. Зрительные нервы пересекаются, и каждый нервный пучок разделяется так, чтобы сигналы одной стороны поля зрения (от обоих глаз) поступали в противоположное полушарие.

После этого сигналы попадают в одно из ядер таламуса, известное как *латеральное коленчатое тело*. Затем сигналы достигают первичной зрительной коры головного мозга, расположенной в затылочной доле.

Другие области коры головного мозга тоже отвечают за обработку зрительной информации. Каждое из ядер таламуса получает сильные обратные связи от коры головного мозга. И хотя это основной путь обработки зрительной информации, также существуют вспомогательные маршруты, необходимые для регистрации дневных и ночных ритмов и контроля движений глаз.

Насколько нам известно, это самая сложная, но и самая изученная система восприятия информации в организме человека. Она отражает поэтапное построение восприятия из простых элементов с непрерывной обратной связью от более высоких уровней, содержащих информацию об окружающем мире.

МРТ-изображение глаз и мозга человека

Сетчатка глаза: место, куда попадает свет

Свет проникает через линзу в передней части глаза и фокусируется на сетчатке. Раньше считалось, что на этом этапе глаз перестает функционировать подобно камере. Но, возможно, в наши дни эта аналогия работает лучше. Современные камеры обходятся без пленки, а изображение регистрируется фотонным детектором, отправляющим электрические сигналы в компьютерный процессор. Глаз работает сходным образом.

Этот этап зрительной системы демонстрирует, что органы чувств не просто реагируют на раздражители окружающего мира, а запрограммированы на их поиск. Глаз находится в постоянном движении, сканируя важную информацию в поле зрения. Сетчатка не просто выступает в роли пассивного реле; напротив, она обеспечивает первичную обработку информации.

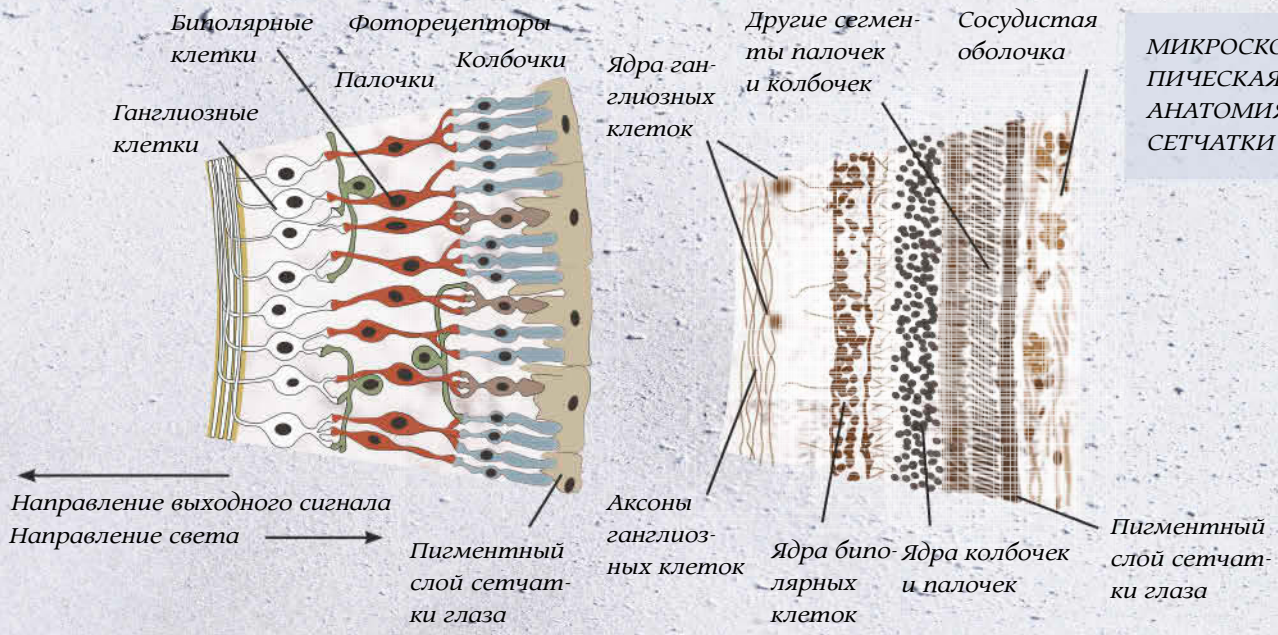
На сетчатке глаза с разной плотностью размещаются фоторецепторные клетки двух типов: *палочки* и *колбочки*. Палочки чувствительны к любому свету, каким бы тусклым он ни был. Колбочки, представленные в сетчатке в меньшем количестве, отмечают детали при ярком свете и по-своему чувствительны к световым волнам разной длины, обеспечивая цветовое зрение. У большинства людей есть три вида колбочек, у некоторых — два, а у некоторых — четыре, такие люди лучше других различают цвета.

Фоторецепторные клетки расположены под двумя другими слоями. Прямо над ними находятся клетки, более или менее походящие на нейроны, способные почувствовать изменения электрического потенциала в фоторецепторных клетках и передать их дальше. Верхний слой ганглиозных клеток уже в полной мере считается нейронным. Эти клетки получают от нижнего слоя входную информацию на предмет повышения или понижения уровня возбуждения. Каждая ганглиозная клетка посылает вереницу импульсов вниз по аксону, который, в свою очередь, формирует зрительный нерв, а тот поступает к коленчатому телу в таламусе.

Цифровая камера захватывает совокупность пикселей

С клеток глаза начинается сложный процесс генерации изображения

МИКРОСКОПИЧЕСКАЯ АНАТОМИЯ СЕТЧАТКИ



КЛЕТКИ СРЕДНЕГО СЛОЯ СЕТЧАТКИ — МИКРОСНИМОК СЕТЧАТКИ

Такая слегка запутанная схема позволяет осуществить первичную обработку, поскольку ганглиозные клетки суммируют сигналы от большого количества нижележащих фоторецепторов. В среднем на 100 млн фоторецепторных клеток приходится 1 млн ганглиозных. «*Горизонтальные*» *клетки* среднего уровня помогают отфильтровывать информацию от сетчатки, соединяя группы клеток своего слоя, а также верхнего и нижнего.

Увидеть невидимое

Зрительное восприятие — простейший способ испытать себя. Вы с легкостью можете доказать наличие слепого пятна с помощью изображения крестика и маленького шарика на расстоянии 5 см друг от друга. Закройте правый глаз и сконцентрируйте левый на шарике; затем медленно приближайте книгу — и вы обнаружите точку, в которой крестик «исчезнет» (повторите процедуру, закрыв левый глаз и наблюдая правым за крестиком до тех пор, пока кружочек не исчезнет).

Просто и достоверно. Важность заключается не в самом существовании слепого пятна, а в неосведомленности человека о его существовании. И несмотря на отсутствие светочувствительных рецепторов в этой области сетчатки, мозг достраивает воспринимаемое изображение.

Более тщательное исследование слепого пятна подтверждает корректировку изображения мозгом. Поднесите цветной предмет в форме пончика напротив одного глаза и постарайтесь зафиксировать его положение. Если предмет расположить таким образом, что внутреннее отверстие целиком попадет в слепое пятно глаза, а его поверхность выйдет за пределы слепого пятна,

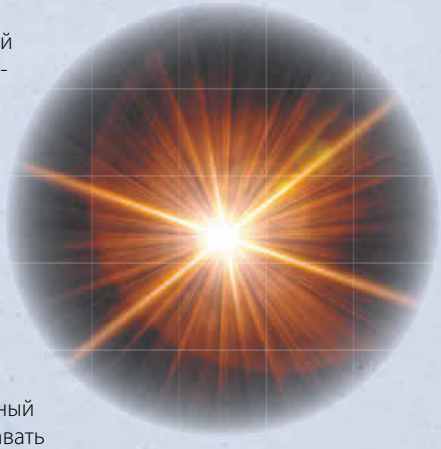
НАЙДИТЕ СВОЕ СЛЕПОЕ ПЯТНО

СЛЕПОЗРЕНИЕ

Ловкий трюк мозга с ретушью слепого пятна обеспечивает сознательное ощущение в одной области поля зрения без внешнего вмешательства. Умы нейробиологов не на шутку будоражит одна феноменальная способность, свойственная людям с повреждениями первичной зрительной коры головного мозга. Проще всего ее продемонстрировать, когда травма затрагивает одно полушарие. Такие пациенты слепы на одну сторону поля зрения, противоположную стороне повреждения; но если попросить их без движения глаз предположить, где промелькнул луч света, весьма вероятно, что они верно укажут область, даже если вообще не «видели» вспышку.

Слепозрение — состояние, при котором люди могут распознавать зрительные образы (крестик или кружочек перед глазами и как расположена линия — горизонтально или вертикально).

Поступающая от сетчатки информация передается на обработку другим областям мозга, у которых нет доступа к частям зрительной системы, формирующим сознательный зрительный образ. Такой обходной путь не обеспечивает полноценного зрения, но позволяет распознавать визуальные образы, не воспринимая их осознанно.



испытуемый получит однотонное изображение цветного круга (без внутреннего отверстия). Это наглядное доказательство того, что воспринимаемый нами зрительный образ не просто считывается с сетчатки глаза.

Чтобы увидеть вспышку, не обязательно задействовать сознание: мозг все еще может зарегистрировать свет

Что могут «видеть» нейроны?

Важная информация о работе зрительного восприятия была получена при регистрации отдельных нейронов из разных областей зрительной системы. Экспериментальное исследование раскрывает воздействие на определенные клетки элементов изображения, находящихся в поле зрения. Реакция рассматриваемых в данном случае клеток может помочь воссоздать процесс разделения изображения в головном мозге.

С помощью продолжительных экспериментов (главным образом на животных) удалось установить следующее: разные аспекты изображения активируют специальные нейроны, которые позволяют глазам и мозгу регистрировать специфические особенности зрительного образа перед ними.

Уже в 1930-х годах было выявлено, что возбуждение одних клеток гораздо более просто устроенной зрительной системы лягушки происходит при включенном свете (клетки с *on*-центром), а возбуждение других клеток — при выключенном (клетки с *off*-центром). На *on*/*off*-реакции можно влиять с небольшой области на сетчатке глаза — *рецептивного поля* клетки.

В 1950-х годах влиятельный венгерско-американский нейрофизиолог Штефан Куффлер продемонстрировал, что клетки не ограничиваются простым попаданием в рецептивное поле. Некоторые из 500 000 ганглиозных клеток сетчатки лягушки реагировали, когда свет попадал непосредственно в центральную зону рецептивного поля, а не на периферическую. Поведение других клеток было прямо противоположным. Как это часто бывает при обработке сенсорной информации, система реагирует на существенные различия.

«Цель обнаружена»: визуальная обработка у лягушки тесно связана с обнаружением добычи

Проведение большего количества экспериментов на лягушках более детально раскрыло деятельность ганглиозных клеток сетчатки. В классической статье «Что глаз лягушки сообщает ее мозгу?» (1959) показано, как лягушки фиксируются на маленьких, темных и подвижных объектах — потенциальной добыче (насекомых) — и едва ли видят что-то еще. Со слов авторов работы, «глаз передает мозгу уже интерпретированную информацию, а не ретранслирует более или менее точную копию распределения света на рецепторах». Данная цитата справедлива и по отношению к существам с бо´льшим количеством уровней обработки в зрительной системе, чем у рассмотренной выше любительницы насекомых.

«Внезапно аудиометр напомнил пулеметную очередь»

Изображение с сетчатки поступает в первичную зрительную кору, причем изображения с соседних областей сетчатки проецируются на соседние области зрительной коры. Но что знают кортикальные клетки помимо информации о пространственном расположении?

У кошек острота зрения ниже, чем у людей, однако при слабом освещении их зрение более чувствительно. Несмотря на это процессы обработки информации в зрительной коре схожи

Чистая случайность привела двух ученых в конце 1950-х годов к великому открытию. Дэвид Хьюбел и Торстен Визел исследовали реакции нейронов коры головного мозга, проецируя световые вспышки перед глазами кошки при помощи предметных стекол, вставленных в офтальмоскоп. Однако регистрируемая реакция была неинформативна. Позже они обнаружили, что корковый нейрон с прикрепленным к нему микроэлектродом проявил спонтанную реакцию, когда стекло слегка вышло за пределы воздействия. Позднее Хьюбел писал: «Внезапно аудиометр напомнил пулеметную очередь». Реакция этой кон-

Дэвид Хьюбел (слева) и Торстен Визел в лаборатории

кретной клетки была связана не со световым пятном, как ранее ожидалось, а с движущейся черной тенью от края предметного стекла.

Эта подсказка подтолкнула их отслеживать реакции других клеток на схожие раздражители: движущиеся или наклоненные под определенным углом линии. Направление и длина линий также играли немаловажную роль.

Ученые установили, что большинство корковых клеток способны получать входные сигналы от обоих глаз, в отличие от нейронов в зрительной области таламуса. Объединение сигналов от сетчаток обоих глаз происходило где-то по пути, хотя каждая отдельная клетка склонна сильнее реагировать на стимул от «своего» глаза, чем от «чужого». Метод радиоактивной маркировки, помечающий активные нейроны, позволил ученым показать, как эта «*доминантность одного из глаз*» организована на уровне клеток, которые в организованном порядке смешиваются в этой части коры головного мозга.

В 1981 году Дэвиду Хьюбелу и Торстену Визелу присудили Нобелевскую премию по физиологии и медицине за глубокий анализ области зрительной системы. *Только лишь области!* Возбуждение этих клеток не означает, что, например, движущаяся линия — это то, что мы осознанно видим в конкретный момент. Это только один из этапов обработки зрительной информации, после которого сигнал передается дальше в вышестоящие уровни системы для сравнения и объединения.

Одно изображение, множество карт

С тех пор как Дэвид Хьюбел и Торстен Визел разработали карты восприятия корковых клеток, их работа была значительно дополнена. Сведения, полученные в ходе проведения разных исследовательских работ, отображают весь процесс обработки поступающей информации. Изучение людей и животных

с повреждениями в головном мозге до сих пор вносят неоценимый вклад в науку. При регистрации сигналов от одиночных нейронов удалось добиться получения более точных данных. Существуют исследования, в которых определенные клетки в ответ на стимуляцию передавали сигналы о восприятии людей и поведении животных — и отслеживался соответствующий эффект.

Такая работа выявляет другие области коры головного мозга, фиксирующие разные компоненты зрительного образа. Входные характеристики таких нейронов настроены так, что они могут зарегистрировать глубину изображения, форму, длину и цвет световых волн и различные движения. Процесс обработки входных сигналов в зрительной коре головного мозга напоминает сборку пазла, где каждый кусочек обладает своими характерными чертами. Исследователи вслед за аксоном подошли вплотную к областям, связанным с дальнейшей обработкой сигналов от первичной зрительной коры головного мозга, что позволяет регистрировать реакции на более сложные зрительные паттерны (например, лица).

Нам известно, что узнавание лиц, скорее всего, связано с определенным этапом нейронной обработки, поскольку эта способность может пропасть у многих людей с нормальным зрением. *Лицевая агнозия*, или *прозопагнозия*, проявляется в неспособности узнать человека даже из самого близкого окружения. Люди с таким расстройством не могут соотнести воспринимаемое ими лицо с каким-то определенным человеком. Они идентифицируют человека по другим ориентирам, например по фигуре, голосу или прическе.

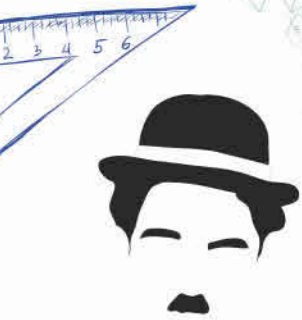
В 2005 году исследователи из Калифорнийского технологического института (более известного под сокращенным названием Калтех) обнаружили нейроны, активизирующиеся при распознавании черт лица определенного человека. В качестве испытуемых выступали люди, которым были временно имплантированы электроды для лечения эпилепсии. Так ученые открыли так называемые *нейроны Дженнифер Энистон*. Узнавание лица (любого человека, а не только знаменитостей) — условный рефлекс, который развивается в течение нескольких дней. Это явление открывает возможности для изучения изменений в нейронных сетях, лежащих в основе обучения и памяти, а не только визуального распознавания (подробнее см. гл. 7).

Кодировка лица

Поразительное открытие 2017 года пролило свет на производимые мозгом вычисления для кодирования зрительного восприятия лица. Команда Дорис Цао из Калтеха исследовала небольшие области клеток в мозге макаки, известные как лицевые пятна. Они смогли в детально отследить кодировку изображения в данной области мозга, тем самым обнаружив «невероятно простой код для идентификации изображения лица… который можно использовать как для точного декодирования реалистичных изображений лиц по реакциям разных людей, так и для точного прогнозирования частоты импульсов нейронов».

Ученые обнаружили, что отдельные нейроны реагируют не на конкретное лицо в целом, а на простые характеристики каждого лица.

Свой эксперимент Дорис Цао и ее команда начали с обработки изображений лиц для получения 50 простых параметров. Они использовали этот код для создания 200 разных лиц с помощью компьютера, которые различались точно измеряемыми параметрами.



Нам достаточно всего нескольких входных сигналов, чтобы распознать лицо, но как?

При демонстрации изображений обезьянам ученые выяснили, что отдельные нейроны в лицевых пятнах реагируют на определенные параметры лица. После того как они отобразили на карте достаточное количество клеток, им удалось восстановить лица людей, на которых смотрели обезьяны, по реакции нейронов. Явное сходство полученного изображения с исходным натолкнуло ученых на мысль, будто бы сам мозг воспользовался их кодом.

Если предположение действительно верно, то ученые нашли ключ к реальной работе перцептивной способности: пара сотен нейронов примата кодируют детали лиц. За каждой клеткой закреплена своя ось в пространстве всех возможных лиц. Набор совершенно разных лиц с одним общим параметром, к которому сенсибилизирован нейрон, вызовет у него одинаковый ответ. Для распознавания отличительных черт каждого лица необходима совокупность реакций всех этих нейронов.

При распознавании знакомого лица задействуются и другие области мозга, однако это принципиально новый взгляд на исходное кодирование. Даже самое любимое лицо можно представить геометрически. Исследователи предполагают, что в последующих работах удастся раскрыть схожие принципы кодирования других сложных объектов.

Создание зрительного образа

Ученым удалось достаточно корректно представить общую модель зрительной системы: зрительный образ поступает от сетчатки глаза в таламус, откуда передается в различные области зрительной коры головного мозга. Как и в любой сенсорной системе, здесь не обходится без пересечений и избыточности. Затем результаты анализа поступают в теменную долю — путь, именуемый ***дорсальным путем***, — или в височную и лобную доли по ***вентральному пути***.

Для получения реалистичного изображения с помощью компьютера необходима интенсивная обработка информации. Возможно, наш мозг более умелый?

Изначально данные зрительные пути именовались «Где?» и «Что?», поскольку первый специализировался на пространственной информации, а второй заведовал более сложной предметной идентификацией. Фактически оба пути задействованы в расшифровке «*Что?*» и «*Где?*», однако дорсальный путь представляет выходную информацию, относящуюся к действиям, в то время как вентральный путь ведет к областям, связанным с распознаванием.

А ты видишь собаку или кошек?

Вся эта система наводит на рассуждения: когда имеет смысл воспринимать мозг как группу автономных модулей, а когда как единое целое?

Подобным образом исследования зрительной системы дают основания полагать, что наш мозг немного редукционист. Он разбивает изображение на множество разных компонентов: движущееся пятнышко света в этой части, угол в той, отверстие, контур, контраст между двумя цветами, паттерн, напоминающий чье-то лицо, и т. д.

И все же, тогда как некто с нормальным зрением может при желании сосредоточиться на какой-то одной из этих характеристик, мы, как правило, воспринимаем образ как нечто неделимое. Не совсем ясно, как именно это происходит. Основоположник нейробиологии Фрэнсис Крик справедливо заметил, что в то время как ученые многое знают о разделении зрительного образа, совсем мало известно о том, как мозг собирает его воедино. Это утверждение актуально до сих пор.

Художники-абстракционисты способны изобразить главные элементы образа с помощью нескольких штрихов... если ваш мозг дополнит недостающие детали

Не стоит забывать о не менее важном вопросе: нужна ли мозгу особая область нейронной сети для синтеза изображения? Это, в свою очередь, вызывает еще более сложный вопрос: можем ли мы определить месторасположение сознания? Мы еще к этому вернемся, но не ждите простых объяснений.

Кортиев орган — отдел внутри улитки, где волосковые сенсорные клетки преобразуют звуковые колебания в нервные импульсы

Позитивные вибрации

Волосковые сенсорные клетки во внутреннем ухе

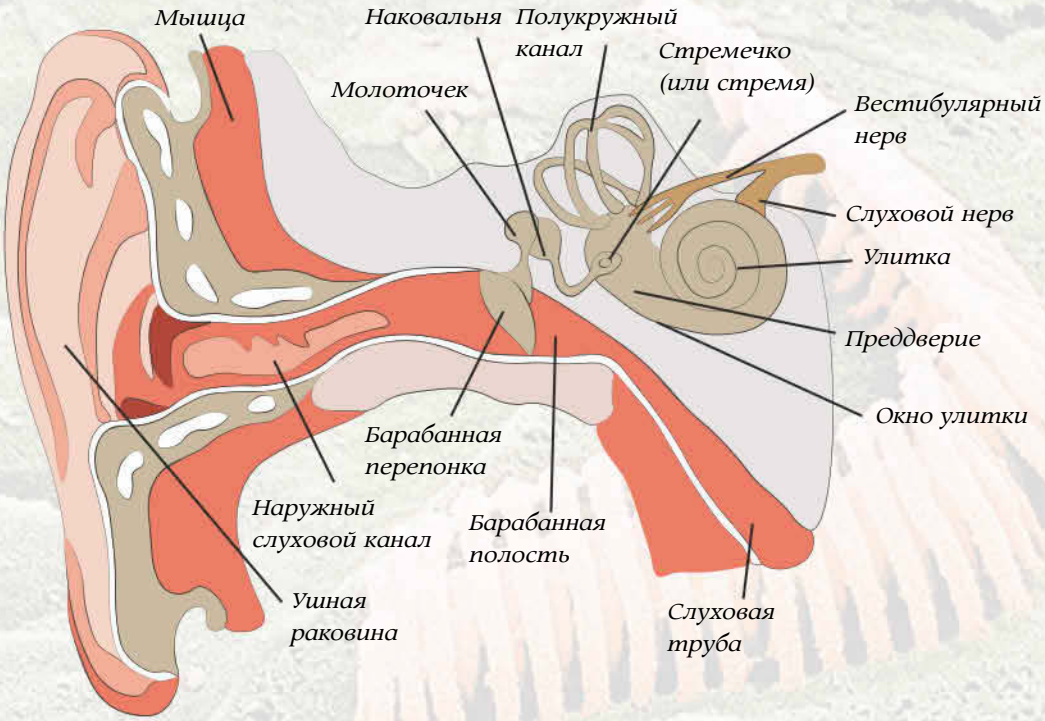
Отойдем от подробностей и обратим свое внимание на два крайне важных факта о зрительной системе: 1) входящие сигналы различными способами обрабатываются на нескольких этапах; 2) существует множество связей между верхними и нижними уровнями, интенсивно используемых мозгом для генерации и проверки гипотез о происходящем в окружающем мире.

Эти характеристики также можно проследить в процессе обработки мозгом звуков. На этот раз сенсорные нейроны превращают звуковые колебания, передаваемые из наружного воздуха через жидкость внутри спирали улитки во внутреннем ухе, в разряды аксонов. Волосковые сенсорные клетки необычайно чувствительны; у них есть микроволоски, способные генерировать реакции при отклонении даже на 0,3 нм (что примерно равно ширине атома).

Сгенерированные сигналы передаются по слуховым нервам в ствол мозга и далее по одному из множества маршрутов проходят в слуховую зону коры головного мозга. Базилярная мембрана улитки, поддерживающая микроволоски, устроена таким образом, чтобы реагировать на колебания различной частоты вдоль своей длины, и относительные координаты клеток сохраняются при проецировании на первичную слуховую кору.

Это один из способов отслеживания частоты колебаний; другой способ учитывает то, что стимул в этой системе — слышимый звук — находится на частотах в диапазоне возбуждения нейронов. Частоты примерно до 5000 Гц (в слышимом человеком диапазоне от 20 до 20 000 Гц) могут быть зарегистрированы нейронами, которые генерируют импульсы с такой же частотой.

Слуховой анализатор может регистрировать интенсивность, а разница между интенсивностью и временными характеристиками колебаний позволяет распознавать направление звука.



Звуковые сигналы преобразуются в нервные импульсы глубоко внутри уха

Более сложная обработка охватывает нейроны, реагирующие на схожие тона, сложные сочетания частот или звуковые колебания с понижающейся или повышающейся частотой, на различную продолжительность звука. Знаковая сторона звука проходит более сложную обработку через связи с областями, отвечающими за язык, например центр Брока.

«Нет, запах сильнее, чем образ иль звук, сердечная чует струна»

Обоняние

Взгляните на собаку, свободно разгуливающую по улицам города: она постоянно в движении, мечется от места к месту в поисках новых запахов. Обоняние собаки служит напоминанием о том, что органы чувств любого живого существа в первую очередь предназначены для поиска ценной информации, а не просто для пассивного принятия сигналов.

В качестве наглядного примера мы взяли именно собаку, поскольку бóльшую часть времени она контактирует с землей и концентрирует немало усилий на толковании запахов. *Обонятельный эпителий* собак — слой клеток в задней верхней части носовой полости, куда поступает запах, — содержит более 200 млн рецепторных клеток. У нас, прямоходящих двуногих животных, отдающих предпочтение зрению, имеется лишь 5 млн.

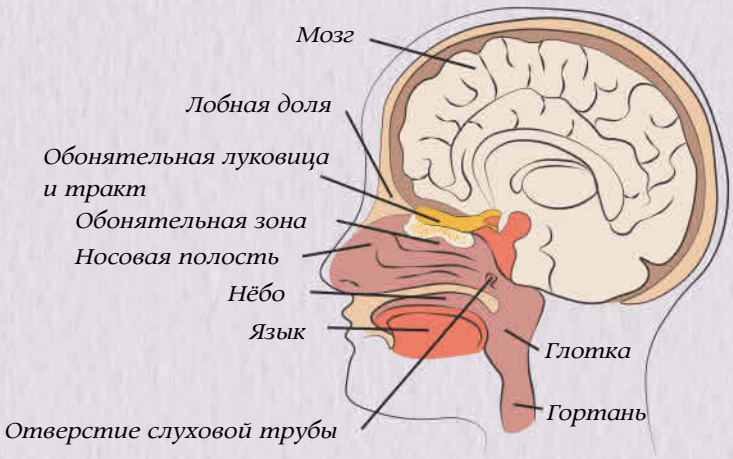
И все же аромат наделен могуществом. «Нет, запах сильнее, чем образ иль звук, сердечная чует струна», — писал Редьярд Киплинг. Нейробиология подкрепляет это фактами: молекулы, достигающие задней части носа, активируют клетки, которые передают информацию по черепно-мозговым волокнам через обонятельную луковицу и таламус непосредственно в гиппокамп и миндалевидное тело — зоны головного мозга, пробуждающие эмоции.

Изображение нейронов в обонятельной луковице собаки, выполненное Гольджи в 1875 году

Строго говоря, мы обнаруживаем запахи в воде, а не в воздухе, поскольку до встречи с рецепторами молекулы, формирующие запах, растворяются в слизи. Детекторы молекул впервые развились в водной среде и с тех пор работают именно в ней.

Многообразие рецепторов подтверждает степень важности запаха. В 1990-х годах у грызунов было обнаружено около тысячи различных генов обонятельных рецепторов, свойственных семейству млекопитающих. В процессе эволюции человек потерял многие из них, но все же сохранил по меньшей мере 350 отличных друг от друга рецепторов. Большинство обонятельных клеток образуют только один вид рецепторов, и сигналы от каждого вида попадают в одну и ту же область обонятельной луковицы.

Как уже было упомянуто, у сенсорных систем имеются пересечения и избыточность. Каждый рецептор распознает множество различных молекул, и любая из этих молекул в различной степени активирует разные рецепторы. Большинство исследователей предполагают, что рецепторы реагируют на форму молекул, хотя существуют и альтернативные теории для объяснения разнообразия реакций на запах, которые углубляются в квантовую механику.



Благодаря 350 различным обонятельным рецепторам мы можем оценить прекрасный букет

На более высоком уровне обработки происходит анализ паттернов сигналов от определенной молекулярной смеси для создания ощущения конкретного запаха. Мы способны различать море запахов, однако до предела еще далеко.

Вкусовые ощущения

Вкус является еще одним представителем ощущений, возникающих под влиянием химических реакций, но в отличие от запаха его система устроена несколько проще. Дело в том, что чувство обоняния выступает в роли первой линии защиты нашего организма от опасных химических веществ. Запах — первое, что насторожит вас. Не обязательно всматриваться, вслушиваться, трогать и пробовать: при резком запахе вы моментально задержите дыхание. Вкус подскажет вам выплюнуть ядовитое вещество, но он скорее приспособлен к усилению предпочтений, чем к избеганию.

Различение вкуса происходит на кончиках рецепторов, расположенных на 5–10 тысячах вкусовых луковиц языка и других областей рта. Каждая луковица может содержать более 100 сенсорных клеток.

На основе нейронных сигналов, вызванных разными механизмами работы рецепторов, выделяют пять основных вкусов: сладкий, соленый, горький, кислый и недавно признанный в качестве самостоятельного вкуса *умами* (или «приятный вкус»).

Соленый и кислый вкусы зависят от специальных ионных каналов для натрия и водорода соответственно. Другие вкусовые ощущения вызываются совокупностью рецепторов определенного вида, самым большим классом из которых являются рецепторы горечи, которые отражают диапазон токсичных химических веществ, производимых различными растениями (разумеется, таких растений лучше старать-

Пять вкусов

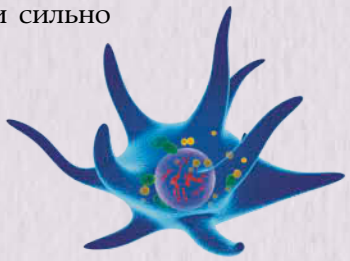
ВКУСОВЫЕ КЛЕТКИ

Несложно заметить маленькие бугорки (сосóчки) на языке — там, где вкусовые луковицы готовы воспринять поступающие химические вещества. За последние несколько десятков лет картографы клеток обнаружили идентичные рецепторы и в других частях тела. Мы не осознаем этого, поскольку они не связаны с участком головного мозга, ответственным за обработку сигналов от вкусовых рецепторов. Рецепторы горького вкуса в кишечнике способствуют непроизвольным реакциям на испорченную пищу. Соответствующие клетки в носу и легких стимулируют чихание при обнаружении продуктов жизнедеятельности болезнетворных бактерий.

Рецепторы сладкого вкуса в кишечнике напрямую не связаны с нервной системой, но они влияют на высвобождение гормонов, которые благотворно влияют на пищеварение. Существует множество других вкусовых клеток, например в желчном протоке, о функциях которого все еще ведутся споры.

Сосочки на поверхности языка

ся избегать). В ходе проводимых в начале XXI века исследований удалось выяснить вышеперечисленные детали, однако точный процесс превращения рецепторных сигналов во вкусовые ощущения по-прежнему остается загадкой. Однако мы знаем, что взаимодействие обонятельных рецепторов с молекулами пережеванной пищи сильно способствует общему вкусовому ощущению.



Клетка Меркеля

Осязание

Прикосновение, как и запах, имеет очевидное практическое значение и помимо этого обладает сильной эмоциональной окраской. Когда мы говорим о наших чувствах к кому-то или чему-то — о том, что нас ***трогает***, — это одновременно и метафорично, и нет.

Кожа — наш самый большой чувствительный орган, способный воспринимать текстуру и реагировать на колебания и давление, тепло, холод и боль. Тактильное ощущение предоставляет актуальную информацию о событиях внешнего мира (как, например, проникновение осколков стекла в ногу), а также участвует в поиске информации, связанной с другими органами чувств. Представьте, что вы ищете в кармане нужную монетку с помощью тактильных ощущений: перебирая монеты пальцами, вы определяете их размер, а следовательно, и номинал.

Под кожей находятся осязательные механорецепторы различных типов

Для высокоразвитых живых существ процесс простого физического контакта с объектами все еще имеет большую значимость. Прикосновения являются важнейшим аспектом коммуникации (объятия, ласка и поцелуи, щекотка), необходимым для полноценного протекания нашей социальной, сексуальной и семейной жизни.

КЛЕТКИ МЕРКЕЛЯ

Процесс обработки тактильных данных начинается с их поступления в различные рецепторы. В 1870-х годах немец-

кий анатом Фридрих Меркель выявил так называемые *осязательные клетки*, известные сейчас как *клетки Меркеля*, небольшие скопления которых содержатся в *тельцах Меркеля*. Эти клетки воспринимают угловатые и шероховатые поверхности. Подобно возбуждению нервных окончаний, известных как *тельца Руффини*, которые активируются при растяжении и сжатии кожи, возбуждение телец Меркеля продолжается до тех пор, пока длится осязательное раздражение. Дополняют квартет основных тактильных рецепторов еще два типа клеток: одни расположены у поверхности кожи и реагируют на низкочастотные колебания, а другие находятся глубже и регистрируют высокочастотные колебания.

Помимо этих механорецепторов в коже есть свободные нервные окончания, которые фиксируют легкие прикосновения и являются источниками возникновения таких ощущений, как боль, жжение, воспаление, зуд, жар и озноб. На поверхностях кожи, покрытых волосяным покровом, имеются дополнительные нервные окончания, реагирующие на движение волос. Такие области находятся практически по всему телу.

Все эти рецепторы и нервные волокна посылают сигналы в спинной мозг, откуда переходят в ствол головного мозга, таламус и кору головного мозга. Но не все делают это одинаковым образом; некоторые осязательные механорецепторы соединены быстрыми волокнами и передают сигналы, обеспечивающие ориентацию во времени и пространстве. Рецепторы же, расположенные на участках кожи с волосяным покровом, обладают менее быстрыми связями и реагируют, например, на поглаживание кожи другим человеком.

Тщательное исследование

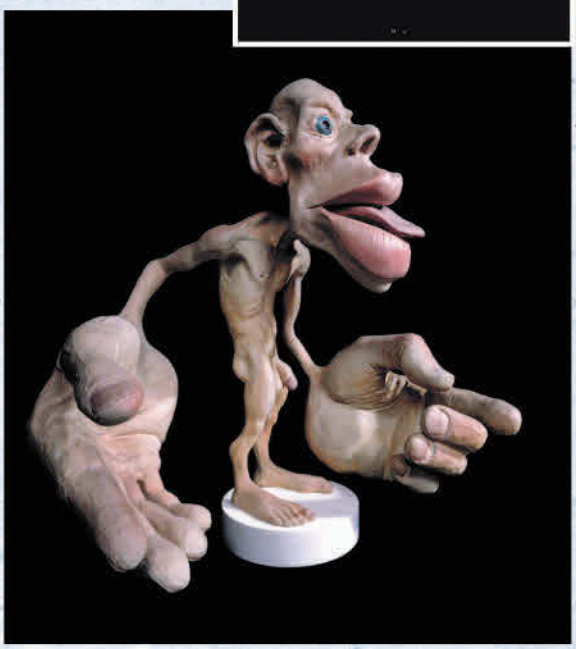
Хирургическое лечение эпилепсии обогатило нейробиологию не только с помощью разделения полушарий головного мозга. Канадский нейрохирург Уайлдер Грейвс Пенфилд исследовал поверхность коры головного мозга, особое внимание уделяя зоне, обрабатывающей сигналы осязательных механорецепторов. Перед хирургическим вмешательством Пенфилд стимулировал мозг с помощью электродов и просил находящихся в сознании пациентов описать свои ощущения. Непосредственной целью исследования было удаление небольших участков коры головного мозга, вызывавших эпилептические припадки, без повреждения здоровой ткани. Однако информация, полученная в ходе диагностики 400 пациентов, позволила ученому создать функциональную карту коры головного мозга.

Он начал свое исследование в 1930-х годах, и многие его открытия выдержали проверку другими методами, но были значительно дополнены новыми фактами. Именно Уайлдер Пенфилд создал некоторые известнейшие изображения в нейробиологии.

Уайлдер Пенфилд и его модель сенсорного гомункула

В 1950 году Уайлдер Пенфилд выступил соавтором статьи с иллюстрацией медицинского художника Гортензии Кэнтли. В статье рассматривались различные области тела при картировании как сенсорной, так и моторной областей коры головного мозга. Размеры каждой части изображения были пропорциональны зонам коры головного мозга, в которых они представлены, поэтому губы, язык, руки и ноги были изображены в увеличенном виде.

На основе полученных данных ученый создал модель человека с аналогичным увеличением размеров, и этот *сенсорный гомункул* стал знаменитым экспонатом Музея естествознания в Лондоне. Эта искаженная нелепая фигура является важным достижением в мире нейробиологии.



Почему ни Пенфилд, ни Кэнтли не создали подобную модель женского пола — *гермункула*? Ответ прост: хирург проводил гораздо меньше операций на женщинах, и, вероятно, было бы не слишком тактично расспрашивать женщину о ее генитальных ощущениях. Женская сенсорная карта все еще не полностью детализирована.

В действительности Пенфилд допустил ошибку при составлении карты мужских гениталий: он локализировал их (несколько преувеличенные) сенсорные входы рядом с областью коры головного мозга, связанной с ногами, и предположил, что именно такое расположение лежит в основе фут-фетишизма. Однако более поздние результаты показали, что мужской орган находится в более привычном нам положении относительно других областей коры.

Дотроньтесь — и я буду там!

В КАЖДОМ ТАИТСЯ ЖАЖДА СЕКСУАЛЬНОГО КОНТАКТА, однако прикосновения играют и менее очевидную роль в отношениях между индивидами. Грызуны чистят и облизывают своих детенышей; люди заключают детей в крепкие объятия. ***Депривация*** же (лишение внешнего воздействия) приводит к тяжелым проблемам в развитии.

Нежные прикосновения оказывают терапевтический эффект на недоношенных детей

Веским доказательством этому служат воспитанники детских домов, обделенные вниманием и заботой со стороны персонала, и недоношенные малютки, жизнь которых поддерживается инкубатором. Последствия этого проявляются в замедлении темпа роста, ослаблении иммунной системы и слабом развитии когнитивных способностей. У тех детей, что провели свое детство в сиротских учреждениях Румынии до смены государственного режима в 1989 году, в подростковом периоде наблюдалось уменьшенное количество белого вещества в головном мозге. Недостаток тактильного общения в детстве может привести к психиатрическим расстройствам и целому букету заболеваний в более позднем возрасте.

С другой стороны, клинические исследования относительно влияния коротких сеансов прикосновений (15–20 минут) выявили их положительное воздействие как на детей, так и на взрослых. Достичь благотворного результата можно посредством массажа, однако другие исследования в этой области продемонстрировали отличную способность человека понимать эмоции через жесты, например такие, как простое прикосновение к руке. Связь между поверхностью кожи и мозгом глубока и трудноуловима. Вариативность прикосновений и их значения в разных культурах отличаются: при помощи простого наблюдения в 1960-х годах в Пуэрто-Рико удалось зафиксировать среднее значение взаимных прикосновений у парочек в кафе — 100 раз за час, в то время как статистика по Лондону составила 0.

И КРЫСАМ НРАВИТСЯ ЩЕКОТКА

В список занимательных, но все еще нерешенных вопросов нейробиологии можно добавить механизм воздействия щекотки. Несколько лет назад исследователи обнаружили, что лабораторная крыса восприимчива к легкой щекотке и уже через пару мгновений будет ласться к руке работника с просьбой о повторных ощущениях. Ко всему прочему, крысы издают ультразвуковой писк, как бы «хихикая». Вопреки ранним теориям о возникновении активности в эмоциональном центре головного мозга, вызванная реакция восходит к соматосенсорной коре. У привыкших к щекотке крыс наблюдается повышенная нейронная активность в соматосенсорных зонах в течение процесса и после него, а электрическая стимуляция соответствующих клеток может вызывать те же признаки удовольствия (писк), что и само щекотание.

ХОРОШАЯ ПОПЫТКА, МОЗГ

Некоторые проявления синестезии кажутся схожими по своей природе с галлюцинациями. Нейробиолог Калифорнийского университета Вилейанур Рамачандран пишет о случае мужчины, ослепшего во взрослом возрасте и изучившего шрифт Брайля. Приобретение навыков письма и чтения с помощью шрифта повлекло за собой серьезные изменения во внутримозговых связях, поскольку увеличенная интенсивность прикосновений увеличивает частоту соответствующих сигналов. Несколько лет спустя мужчина начал видеть вспышки света или яркие изображения при соприкосновении с предметами или чтении шрифта Брайля. Он совершенно не контролировал эти явления, но спустя некоторое время понял, что они возникают при попытке что-то понять через прикосновения. Рамачандран предположил, что соматосенсорная кора его головного мозга посылает сигналы к «его обездоленным зрительным зонам, жаждущим входной информации».

Изучение шрифта Брайля создает новые нейронные связи в зонах коры головного мозга, но не всегда эффективно

Смешанные чувства?

Способность вызывать во снах и галлюцинациях целый ряд несуществующих событий подкрепляет идею о равносильном воздействии на наше восприятие окружающего мира как процессов, происходящих в мозге, так и сигналов от сенсорных нейронов.

Один нейрологический феномен проливает свет на работу восприятия. Некоторые люди способны воспринимать объект наделенным не присущими ему качествами. Возьмем, к примеру, слово «возьмем» в этом предложении: некоторые увидят, что буква *з* — красная, в то время как в действительности она черная.

Восприятие букв или музыкальных тонов цветными — одна из самых распространенных форм *синестезии*, однако практически любые комбинации кажутся возможными, в том числе появление вкусовых ассоциаций и закрепление определенного запаха за конкретным словом или образом.

Теории синестезии фокусируются на необычных связях между областями мозга, например между зонами обработки букв и формирования ощущения цвета в зрительной коре. Некоторые исследователи предполагают, что все новорожденные — синестеты, и большинство из них позже учатся разграничивать сенсорные каналы. И хотя частота возникновения синестезии у взрослых людей не выявлена наверняка, согласно одному исследованию она составляет около 4% как среди мужчин, так и среди женщин.

Вызванное синестезией «единство» чувств вдохновляет художников и поэтов. Неповторимое многообразие цветов каждой буквы более чем одного алфавита аккомпанировало восприятию мира писателя-полиглота Владимира Набокова. «Исповедь синестета назовут претенциозной и скучной те, кто защищен от таких просачиваний и отцеживаний более плотными перегородками, чем защищен я», — писал он.

Осмысление

Проприоцепция — мышечное чувство, которое позволяет нам ощущать положение нашего тела в пространстве и осознавать его движения. Это шестое чувство, равно как и пять ранее представленных в данной главе, таит в себе много неизведанного. Основные положения схожи: чувствительные рецепто-

ры через регистрацию давления, силы и движения генерируют нервные сигналы, которые на этот раз приходят от мышц, суставов и сухожилий, а затем интегрируются мозгом, чтобы выдвинуть гипотезу о текущем положении тела в пространстве.

Вывод гипотез наряду с активным поиском является ключевым понятием изучения чувственного восприятия. Мы не всегда знаем, *как* это работает, но это совершенно точно происходит внутри нас. Чувственное восприятие не просто считывает показания органов чувств, как циферблаты на приборной панели, а, как мы полагаем, предоставляет необработанные данные для численного моделирования нашего окружения.

Профессор Университета Джона Хопкинса Дэвид Линден резюмировал это соображение в своей книге «Осязание». «Наша сенсорная система, — пишет он, — предстает перед нами не в роли правдивого репортера, четко описывающего внешний мир, а в роли творца, вобравшего в себя исторический опыт наших предков и свой собственный для отображения осязаемого мира в живые образы».

Требуется немало усилий, чтобы наполнить мир смыслом. Головной мозг мужчины на фотографии способен преобразовать огромное множество визуальных стимулов в городской пейзаж — изображение, подвластное только человеческому осмыслению

Эволюция чувств позволяет мозгу конструировать модель внешнего мира для выживания, что выступает в качестве доказательства системы трансформации входных сигналов от сенсорных нервов нейронными сетями, а также служит подтверждением более ранних предположений о механизмах работы чувственного восприятия. Герман Гельмгольц при обобщении своих исследований зрительного восприятия в 1860-х годах пришел к выводу, что «воспринимаемые нами образы выступают лишь “знаками” для внешних объектов... и только посредством опыта и практики мы учимся интерпретировать их». С подобным умозаключением сложно согласиться. Почти все операции построения образов восприятия происходят бессознательно, и наш осознанный опыт — позволяющий ориентироваться в реальном мире без лишних усилий — впечатляет. А мышечные движения усиливают актуальное восприятие.

Еще одним примером построения зрительной системы из ограниченного количества информации является компьютерная визуализация, которая воплощает технический рисунок в фотореалистичное изображение здания

Глава 6

ДВИЖЕНИЕ И ЭМОЦИИ

Древнее и современное

Как и у других видов, значительная часть головного мозга человека отвечает за осуществление базовых функций. Многие из них представляют собой автоматические гормональные или нейронные замкнутые цепи, обеспечивающие слаженную работу систем организма. В таком случае существуют системы, ответственные за регуляцию движений, — вероятно, это одна из причин беспрецедентной значимости мозга. Любые действия требуют движений. Эмоции по своему характеру имеют отношение к регулирующим действиям; как и движения, эмоции возникают в нервных сетях, которые впервые появились у людей в эволюционно древних областях мозга, однако теперь соединяют практически все его части.

Человек в движении, запечатленный одним из первых фотографов — Эдвардом Мейбриджем (1881)

Понимание ключевых аспектов происхождения движения на основе изучения изолированных нервно-мышечных препаратов не должно вызывать трудностей. Подобно тому, как способность восприятия зависит от специализированных клеток, связывающих события внешнего мира с нейронами, сокращение мышц обуславливается конкретными двигательными нейронами, которые напрямую синаптически связаны с мышечными клетками.

Некоторые рефлекторные движения возникают в сетях спинного мозга, в то время как более сложные требуют контроля со стороны головного мозга. Так или иначе, происходит активация аксонального сигнала двигательного нейрона, который затем встречается с мышечной клеткой в нейромышечном соединении, где высвобождает нейротрансмиттер — ацетилхолин. Это, в свою очередь, порождает электрические изменения в мышечной клетке, заставляя волокно сокращаться; один потенциал действия от аксона производит одно сокращение. Выделяют медленные и быстрые мышечные волокна, связанные с немного различающимися двигательными нейронами. Частота импульсов нейронов и количество волокон регулируют приложенную мышцами силу. В ноге один нейрон способен активировать более тысячи мышечных волокон, в то время как у маленьких мышц, контролирующих движения глаз или пальцев, может быть всего лишь несколько волокон, связанных с каждым двигательным нейроном. Большинство мышц — с большим или малым количеством волокон — обладают набором двигательных нейронов для осуществления постепенных движений.

Двигательные нейроны в мышечной ткани

Каждый двигательный нейрон, как правило, имеет в своем распоряжении один выходной канал и получает входные сигналы от трех основных путей;

- нейронов спинного мозга (наибольшее количество связей):
- нейронов головного мозга (как и следовало ожидать):
- присоединенных через позвоночник сенсорных датчиков в самих мышцах, которые отслеживают величину их сокращения.

Контролируемое движение

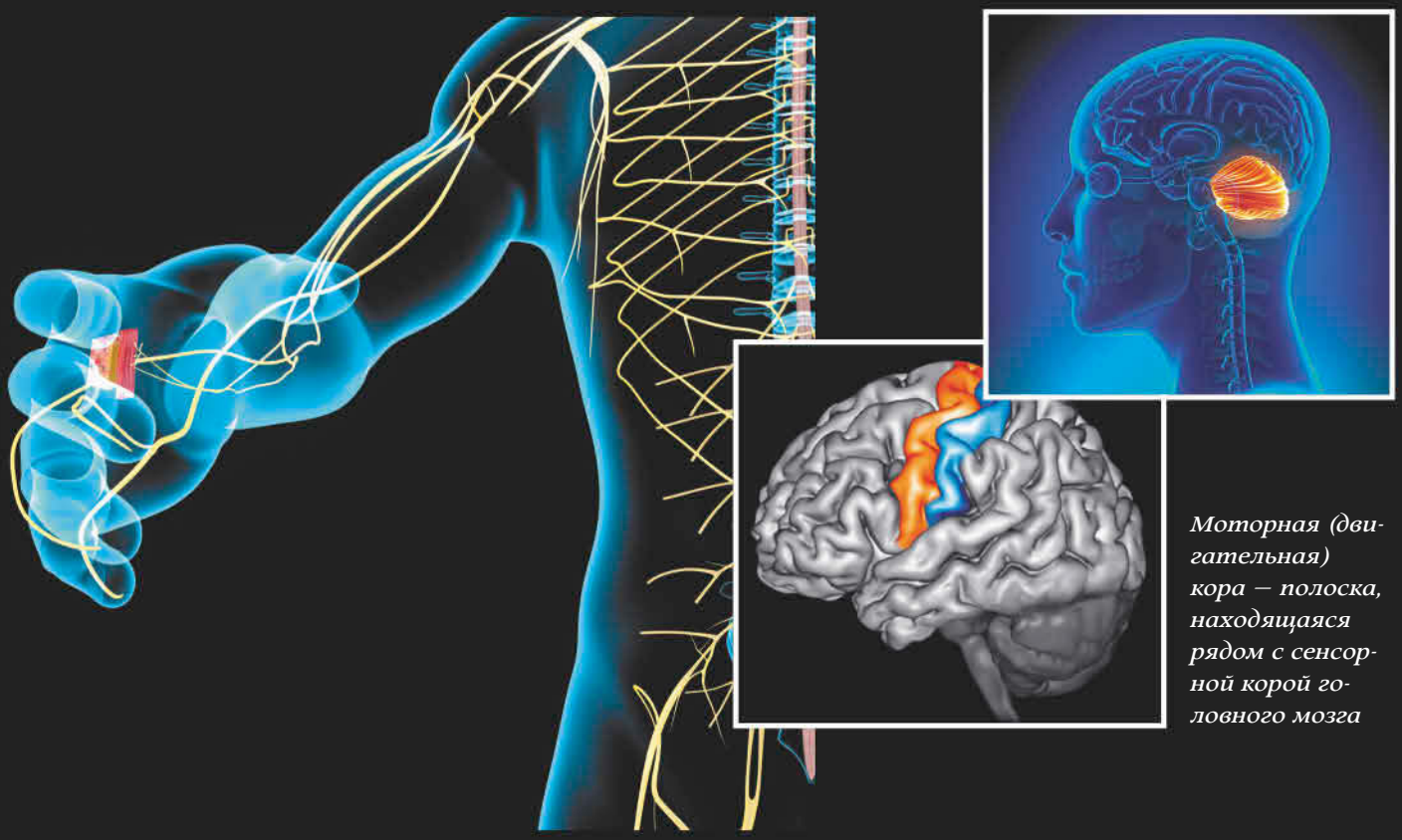
Двигательные нейроны и мышечные волокна нужны для того, чтобы вызывать любые движения — от подъема груза тяжелоатлетом до мельчайших операций кисти каллиграфа. И в том и в другом случае управление произвольными движениями начинается в лобных долях коры головного мозга. Полоска, известная как *моторная (двигательная) кора,* находится прямо перед сенсорной корой и почти так же проективно отображает части человеческого тела. Поэтому двигательный гомункул очень похож на своего сенсорного собрата (см. параграф «Тщательное исследование» в гл. 5).

Поскольку на долю пальцев выпадает множество соединений, мы сосредоточим свое внимание именно на них. В двигательной коре головного мозга есть разные зоны, отведенные простым движениям (например, поманить пальцем) и тонким движениям пальцев. В случае последних *дополнительная моторная область* направляет входные сигналы в первичную моторную кору, прежде чем они отправятся в мышцы, помогая организовать сложные последовательности движений.

Кроме того, моторная кора головного мозга передает свои сигналы в теменные доли коры, а также в мозжечок, который координирует мышечные пары (мышцы, которые сокращаются и работают в противоположных парах) и организует синхронизацию движений. Несколько других зон головного мозга также участвуют в оценке и модуляции движений.

Мозжечок способствует координации движений мышц

Движения пальцев — одни из самых сложных операций, производимых нашим телом



Моторная (двигательная) кора — полоска, находящаяся рядом с сенсорной корой головного мозга

Движение может быть точно отрегулировано благодаря сложным связям в удаленных клетках, фактически его создающих. Например, в большом пальце находится больше 10 различных мышц. Тысячи мышечных волокон, составляющих каждую из них, реагируют на команды от одного двигательного нейрона, выбранного из множества исходных связей в самом начале действия.

И это всего лишь большой палец! Зачастую его движения должны быть скоординированы с остальными пальцами, каждый из которых обладает своим собственным набором мышц, а также с движениями кисти, самой руки и других частей тела при установлении равновесия и, например, попытке что-то взять. Программисты до сих пор силятся сконструировать роботов, способных, скажем, поднять доверху заполненную водой чашку, не уронив ее и не пролив ни единой капли.

Итак, выполнение тонких движений впечатляет, однако наша двигательная система так же хорошо приспособлена к тому, что занимает бóльшую часть времени, — неподвижности.

Взаимосвязь движения и ощущения

На примере строения роботов можно проследить, насколько сложен процесс регуляции движения. Разработка протезов конечностей также раскрывает, как контроль в нашей собственной системе зависит от сенсорной обратной связи.

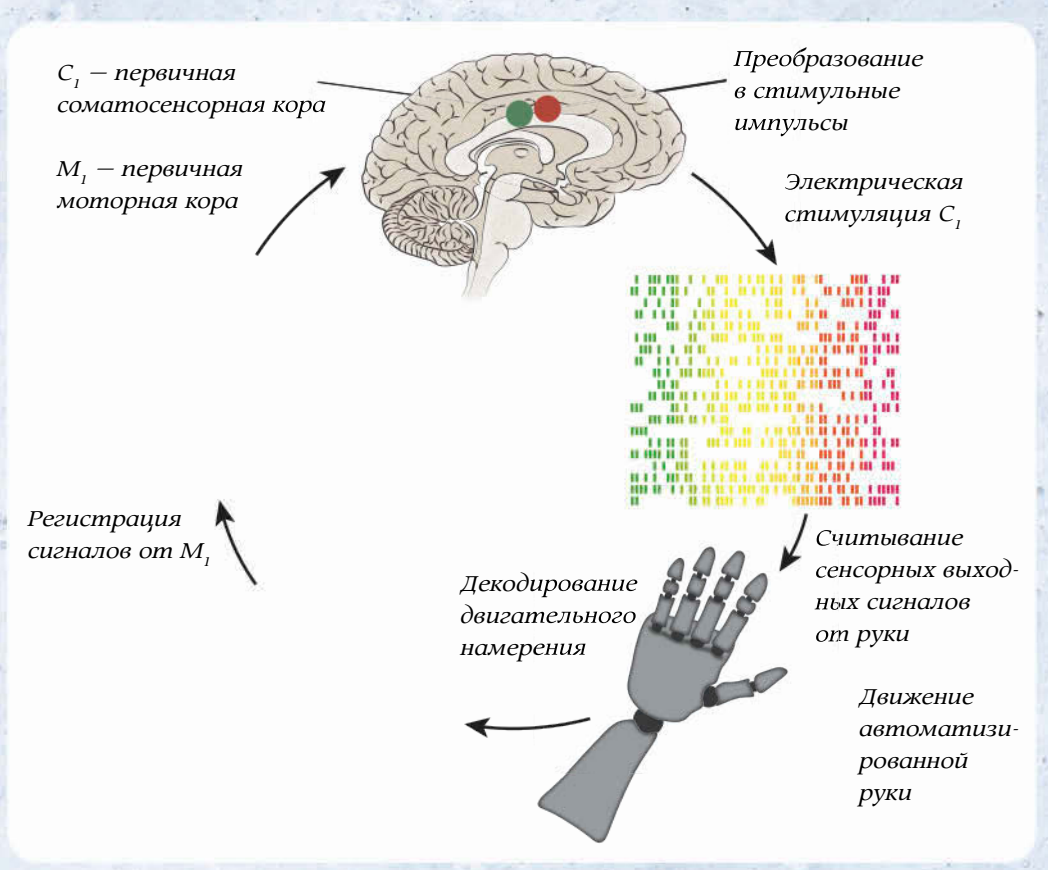
Недавно ученые совершили грандиозный технический прорыв: теперь некоторые искусственные конечности могут реагировать на сигналы от двигательной коры головного мозга и декодировать намерение движения, что позволяет человеку совершать движения силой мысли.

Но, как оказалось, это только полдела. Точные мышечные движения руки при обычных условиях зависят от обратной связи тактильных рецепторов. Ввиду отсутствия этих ключевых признаков человеку с искусственной рукой приходится полагаться на зрительную обратную связь, которая далеко не так хорошо работает.

Слиман Бенсмайя и его коллеги из Чикагского университета исследуют способы отправки сенсорных сигналов в сенсорную кору головного мозга, которые соответствовали бы движениям, воспроизводя полноценную проприоцепцию у протеза.

В настоящее время экспериментальную базу составляют обезьяны. Конечно, они не могут напрямую сообщать о своих тактильных ощущениях, зато их можно обучить указывать место, в котором они чувствуют прикосновение. В ходе эксперимента реальные прикосновения чередовали с электрическими сигналами, искусственно направленными напрямую в сенсорную кору для подтверждения декодированных ранее результатов.

Ученые поставили перед собой задачу создать нейропротез руки, способный отправлять сигналы в нужную область сенсорной коры головного мозга для установления соприкосновения каждой части руки с объектом и оптимизации руководства к последующим действиям. Проект предполагает, что весь спектр ощущений «воспринимается» протезом,



Автоматизированная рука должна получать сигналы, активирующие движения, а затем отправлять выходную информацию, обеспечивая пользователю постоянную обратную связь о своей новой позиции

а не исконной рукой. И хотя люди, утратившие ту или иную конечность, часто сообщают о продолжающихся ощущениях на ее месте (фантомные конечности), существует доказательство, что мозг может приспособиться к наличию протеза, что позволит ощущениям перенестись к нему.

Прогулка в одиночестве

Если вы возьмете новорожденного ребенка на руки и позволите его ножкам коснуться земли, он попробует шагать. Но для того чтобы он смог ходить без посторонней помощи, потребуется немало времени. Действия, на которые мы полагаемся при движении, состоят из многих компонентов, и только некоторые из них развиты с самого рождения.

Обычный шаг активируется простым локомоторным паттерном, осуществляемым нейронными сетями спинного мозга. Животные могут совершать простые движения даже при поврежденных связях с головным мозгом, поскольку их движения связаны с древней сетью, впервые возникшей еще у рыб. У человека эта сеть генерирует ритмичные движения, которые не требуют сознательной активности. Компьютерный аналог нейронной сети выглядит как простая программа для обеспечения стандартной рутинной последовательности движений (хотя к подобным аналогиям следует относиться с осторожностью). Подобным образом во многом устроен и механизм регуляции дыхания.

Не стоит зацикливаться: вы поднимете по ступенькам гораздо быстрее, если будете двигаться на автомате, не думая, куда поставить ногу при каждом шаге

Процесс управления ритмичными движениями вызывает у людей больше сложностей, нежели у других живых организмов, поскольку в нашем распоряжении имеется лишь две ноги и ходьба превращается в своего рода контролируемое падение. Обычная ритмичная прогулка, например на беговой дорожке, требует от мозга интеграции информации от глаз и датчиков давления в ступнях ног, а также от вестибулярной системы — сенсорных нейронов в каналах внутреннего уха, регистрирующих силу гравитационного притяжения. Все это помогает адаптировать положение верхней части корпуса человека и движения рук так, чтобы центр тяжести оставался более или менее над ступнями.

В неизменных условиях легко поддерживать устойчивую походку, однако увеличение скорости беговой дорожки или изменение угла наклона приводит к необходимости мгновенной обработки информации для регуляции скелетной мускулатуры. В основном управление движением происходит неосознанно, однако изменение условий — неровная поверхность, сильное качание корабля во время шторма — приводит к осознанию. При этом стоит только задуматься о том, куда ступать, — и темп прогулки замедлится. Лучше предоставить эту работу высокоразвитой двигательной системе: вы поймете, насколько сильно полагаетесь на нее, лишь когда с ней что-то пойдет не так, например, вы промахнетесь или сделаете лишний шаг в пустоту на лестничном пролете.

Практика — путь к совершенству

Казалось бы, слаженная работа, однако вы не видели их до того, как они начали практиковаться

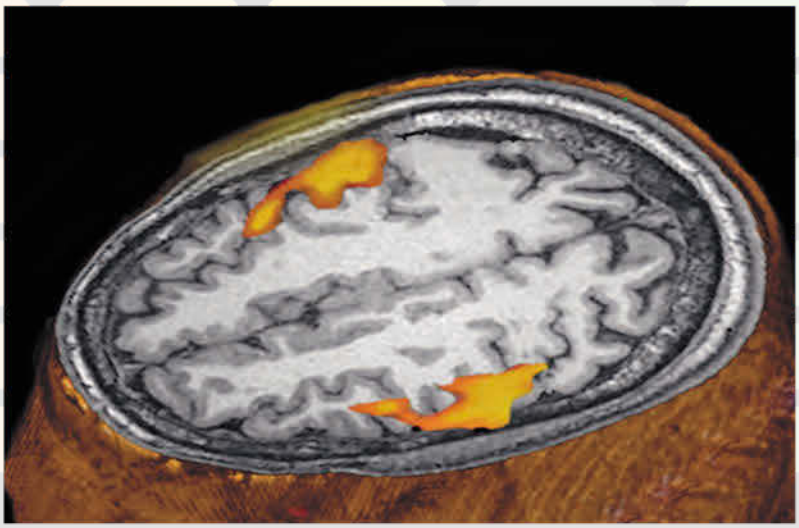
Для точного управления необходимы специализированные нейроны, количество которых увеличивается, если человек работает над освоением нового навыка. Практика движений укрепляет нейронные связи, обеспечивающие усвоение определенного порядка действий (подробнее см. гл. 7), но может повлечь за собой грандиозные изменения в нейронных связях.

Пластичность моторной коры головного мозга выступает подспорьем для происходящих изменений. Некоторые люди рождаются со сращением двух или трех соседних пальцев кисти — это явление известно как *синдактилия*. Структура моторной коры головного мозга развивается у них таким образом, что сращенные пальцы представлены в ней одним набором нейронов. При проведении хирургической операции по разделению пальцев кортикальная карта реорганизуется соответственно, выделяя новые области, отдельные для каждого «освобожденного» пальца.

Сканирование головного мозга музыканта во время репетиции отображает изменения в его структуре: например, у скрипачей зона моторной коры головного мозга для левой руки, отвечающей за аппликатуру, больше, чем для правой, контролирующей движения смычка. Результаты других исследований показывают большее количество синапсов в моторной коре у профессиональных музыкантов в сравнении с людьми, непричастными к миру музыки.

Можно ли научиться играть на инструменте без музыкального образования и опыта? В поисках ответа команда Университета Макгилла в Монреале провела эксперимент на группе начинающих пианистов в возрасте 20–30 лет: 15 молодых мужчин и женщин пытались научиться исполнять отрывки из популярных песен, детских стишков и рождественских песен, занимаясь по полчаса в день на протяжении пяти недель.

Невозможно играть на пианино внутри сканера, поэтому исследователи выполняли сканирование фМРТ во время прослушивания музыки, но не ее непосредственного воспроизведения. С развитием навыка игры снимки отобразили изменения в премоторной и теменной зонах коры. Однако практика — это полдела. Люди с изначально повышенной активностью в слуховой коре головного мозга и гиппокампе (по мнению исследователей, данные области причастны к разбору и запоминанию мелодий) учились быстрее.



МРТ может отследить активность мозга испытуемого во время прослушивания музыки

Исследователи сделали вывод о недостаточности лишь мышечной памяти для освоения сложных навыков. Поэтому практика движения, безусловно, принесет свои плоды, но у некоторых людей результативность будет выше в силу различий в других частях головного мозга.

У меня есть чувства

Страх, злость, грусть, зависть, любовь, счастье, удивление, отвращение. Проявление эмоций объясняется их необходимостью. У нас могут быть праздные мысли, но никак не праздные эмоции. Впрочем, довольно сложно определить эмоции или (некоторые ученые разграничивают данные понятия) их осознанное проявление — чувства. Они отличаются от ощущений, тем не менее эмоции синхронизируются с сенсорными входными сигналами, и некоторая составляющая эмоций, как мы полагаем, является их отражением. Эмоции не подобны и действиям, однако могут провоцировать их. Ясно одно: они определенно могут сказать нам о значимости происходящего события.

Несмотря на схожесть некоторых параметров, все эмоции очень различаются, что подтверждается трудностью определения вовлеченных областей мозга. И хотя некоторые регионы (как правило, очень маленькие) отвечают за конкретные эмоции, многие области головного мозга выполняют свою роль в каждой из них. Можно детально раскрыть строение сенсорных систем, например зрительной, хотя чем дальше исследователи углубляются, тем сложнее они кажутся устроенными, но все попытки определить эмоциональную систему были тщетны в силу огромного спектра задействованных нейронных сетей.

Все же полезно будет кратко рассказать о сопряженных с эмоциями зонах, которые часто объединяют под понятием «*лимбическая система*» (совокупность ряда структур, расположенных близко друг к другу непосредственно под корой головного мозга). Среди них выделяют:

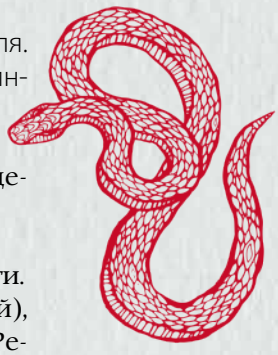
- таламус;
- гипоталамус;
- миндалевидное тело;
- гиппокамп (его участие в эмоциях менее значимо, чем в памяти).

Структуры примыкают друг к другу и соединяются с остальными зонами головного мозга через частично совпадающие сети, и у каждой, несмотря на небольшой размер, есть еще более мелкие анатомически выраженные области или ядра.

Исследователи пытаются установить их сопричастность с конкретными эмоциями. Как известно, эмоции связаны с мощными физиологическими реакциями, которые часто усиливаются гормонами, образующимися в головном мозге. Страх в этом отношении выступает как наиболее изученная эмоция и сосредоточен он в миндалевидном теле.

Нейронная цепь страха

Миндалевидное тело — область, по форме напоминающая плод миндаля. У миндалевидного тела есть множество легко различимых ядер, однако информация в него поступает по двум основным маршрутам:



- один исходит от таламуса, где осуществляются анализ ощущений и отправка выбранных срочных сигналов;
- другой — от части префронтальной коры головного мозга.

Оба маршрута вовлечены в процесс возникновения страха и тревоги.

Существуют инстинктивные страхи (как, например, боязнь змей), которые исчезают в случае повреждения миндалевидного тела. Результаты более тщательных экспериментов показали, что миндалевидное тело активно и в случае, когда мы приобретаем новые страхи на основе пережитых плохих событий, — своего рода условный рефлекс, выработанный в связи с пережитым чувством ужаса.

Запрограммированное состояние? Люди боятся змей, даже если никогда не видели их прежде

Исследователи также изучили противоположный процесс — постепенное затухание страха, когда внушающие ужас раздражители предъявлялись вновь и вновь, не причиняя при этом ментальную или физическую боль. Этот процесс зависит от нейротрансмиттерного рецептора, известного как *NMDA*-рецептор: этому рецептору отводится важная роль в наиболее изученном аспекте синаптических изменений, связанных с обучением. Их мы обсудим в следующей главе.

Под реакцией страха здесь не обязательно понимается чувство испуга. И хотя животные разделяют с человеком физиологические реакции, мы мало можем сказать об их чувствах. Миндалевидное тело имеет отношение к реакциям, присущим и нам, и животным в случае опасности, и помогает набором нейротрансмиттеров и гормонов.

Дополнительными доказательствами вышесказанного выступают:

- роль как минимум некоторых областей миндалевидного тела в распознании испуганного выражения лица у других людей;
- работа на уровне нейротрансмиттеров в этой области (особенно серотонина и дофамина).

В соответствии с предупреждением одного из ведущих исследователей в этой области Джозефа Э. Леду, не стоит рассматривать миндалевидное тело в качестве центра страха. Его предназначение заключается в определении угрозы и приведении в работу классического механизма «бей или беги». Непосредственный входной сигнал от таламуса означает возникновение реакции до осознания угрозы. Но чувство страха может возникнуть и без участия миндалевидного тела, что связано с более сложной системой оценивания областями коры головного мозга. По словам Джозефа Э. Леду, становление нейробиологии началось с таких базовых и повседневных понятий, как страх, но мы не должны относиться к этим понятиям так, «будто они живут в определенных областях мозга, таких как миндалевидное тело».

Персонаж Джанет Ли в фильме Альфреда Хичкока «Психо» обнаружила причину бояться

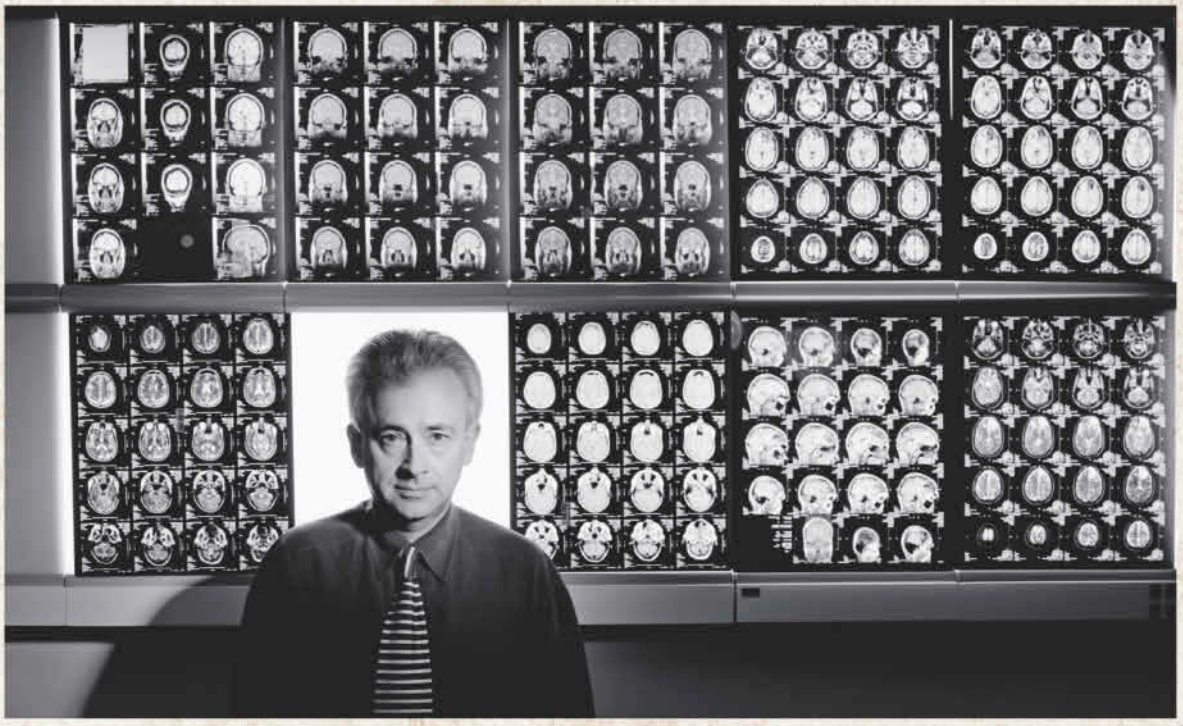
Эмоции, разум и тело

Эмоции нередко рассматриваются как побуждение к действию, стоящее отдельно от процесса принятия решения. Подобное рассуждение подтверждает идею о том, что лимбическая система представляет собой примитивную часть мозга, интегрированную в более сложный аппарат коры головного мозга, — отголосок теории о триедином мозге, господствовавшей в 1950-е годы. Популяризировавший эту теорию исследователь Пауль МакЛин также ввел термин «лимбическая система».

В последнее время ученые стали обращаться к противоположной, более обоснованной и достоверной точке зрения. Профессор Университета Южной Калифорнии Антонио Дамасио утверждает, что эмоции — это результат действий, пусть даже и внутренних. Восприятие физической угрозы (например, если волк следует по вашему следу) стимулирует изменения в организме: учащение сердцебиения, повышение уровня адреналина, прилив крови от живота к мышцам. Затем кора головного мозга по этим автоматическим реакциям мозга и тела определяет состояние страха. Иначе говоря, пять органов чувств отображают внешние состояния в головном мозге, а эмоции отображают состояния тела.

Антонио Дамасио установил, что эмоции в высокой степени связаны с другими действиями. Люди с повреждениями головного мозга, которые так или иначе приводят к утрате их контакта с эмоциями, склонны принимать неверные решения. Общие интеллектуальные и языковые способности этих людей сохраняются, однако они едва понимают, как оценить риски и взвесить возможности, плохо планируют, а также способны без задней мысли разгласить интимную информацию. Что еще хуже, с потерей опознаваемых потребностей и желаний они могут полностью лишиться способности принимать решения. Понятие идеального решения как предмета хладнокров-

Антонио Дамасио



Какой кофе вы предпочитаете? Эмоции определяют выбор даже для простых повседневных решений

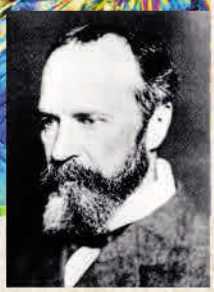
ной рациональной оценки может существовать лишь в абстракции, но не имеет ничего общего с реальными возможностями мозга.

Это масштабный сдвиг в перспективе нейробиологии. Антонио Дамасио признался, что когда он начал исследовать эмоции в 1970-х годах, ему сказали: «Что ж, вы потерпите поражение в силу отсутствия каких-либо взаимосвязей». На данный момент ученый уже может заявить, что чувства представляют собой «умственные переживания состояний тела».

Так, например, голод исходит от физиологической потребности, боль является результатом телесных повреждений, а страх и злость обусловлены опасностью для организма. С другой стороны, хорошее самочувствие — признак оптимального функционирования организма, а сострадание, благодарность и даже любовь — это способы регуляции «особых социальных взаимодействий». Эмоции вовлечены в каждый аспект жизни при помощи тела и разума. Фактически диапазон их влияния даже шире: «Разум начинается на уровне чувств. Вместе с чувствами вы приобретаете разум и личность».

Как и при подходе Гельмгольца к ощущениям, это в какой-то степени возвращение к взглядам XIX века. В эссе «Что такое эмоция?» (1884) первый профессор психологии Гарварда Уильям Джеймс писал: «Если мы представим себе некоторую сильную эмоцию и затем постараемся удалить из сознания переживания всех тех телесных симптомов, которые ей свойственны, окажется, что ничего не осталось, нет никакого “психического материала”, из которого эта эмоция могла бы образоваться, и что сохраняется лишь холодное и безразличное состояние интеллектуального восприятия».

Кристаллизованный адреналин



Уильям Джеймс

ОТСУТСТВИЕ ЭМОЦИЙ

30-летнему мужчине по имени Элиот, за которым наблюдал Антонио Дамасио, удалили доброкачественную опухоль головного мозга вместе с большим участком лобной доли. После операции пациент сохранил интеллектуальные способности, за исключением случаев, где необходимо принимать решение. Утратив все эмоции, он не мог распланировать свой день и назначить встречи, решить, куда пойти на ланч и даже какого цвета взять ручку, чтобы что-либо написать. Он потерял семью и лишился работы; затем снова женился, но и второй брак тоже закончился разводом. Элиот несколько раз пытался заняться бизнесом, но прогорел.

Казалось, Элиот не особо переживал об этом. «Когда он описывал свою жизнь, — говорит Антонио Дамасио, — события не были эмоционально окрашены, хотя он был их главным действующим лицом». Элиот не испытывал глубокого возмущения или разочарования по поводу своих неудач, и когда в ходе тестирования его просили найти варианты решения различных житейских проблем, он с готовностью обрисовал ряд разумных шагов, а затем спокойно сказал: «И после всего этого я едва представляю, что мне делать».

Зеркальные нейроны

Когда кто-то говорит: «Я сочувствую/соболезную тебе», может ли он действительно примерить на себя наши эмоции? Принято считать, что человеку действительно присуще это замечательное качество — ***эмпатия***. А помогает нам чувствовать эмоции других людей особый класс нейронов.

Впервые ученые столкнулись с *зеркальными нейронами* во время изучения движения. В 1990-е годы итальянские исследователи сообщили о том, что им удалось зафиксировать возбуждение некоторых клеток в премоторной коре головного мозга обезьяны при выполнении определенного движения и при наблюдении за выполнением этого же движения другими сородичами.

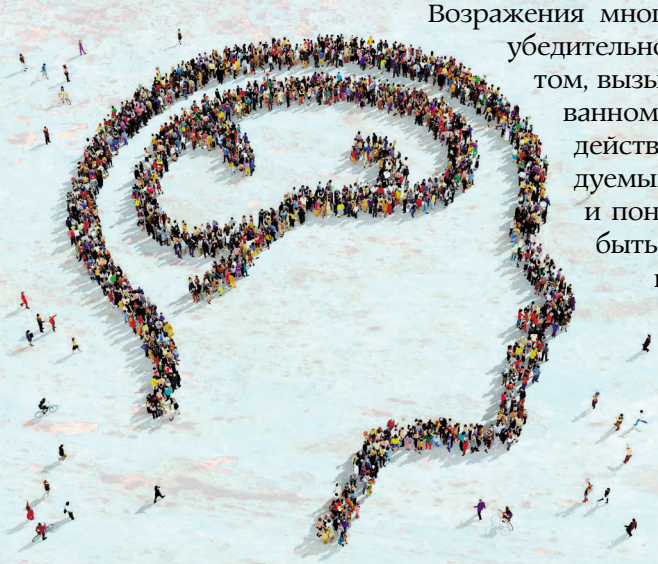
Более того, некоторые нейроны моторной сети реагировали на определенные движения, даже когда обезьяна всего лишь *слышала*, как другой выполняет какое-либо действие (например, складывает лист бумаги). Это наводит на мысль, что слушатели декодировали намерение действия, а не просто прокручивали его в своей голове.

Вышеописанное поведение не выступает в качестве признака эмпатии, но воспринимается как способность к интерпретации мозгом замыслов другого мозга. Исследования с помощью МРТ-сканирования дают основания полагать, что в человеческом мозге имеются подобные нейроны, которые выполняют разного рода функции — от осуществления реальной эмпатии до подражания и ускорения развития человеческой культуры.

Идея о том, что эмпатия включает в себя своего рода повторение эмоций в головном мозге наблюдателя, была подтверждена результатами общих исследований при помощи МРТ-сканирования. Эти исследования отразили повышенную активность в одних и тех же областях мозга, когда кто-то испытывал эмоции сам и видел эмоции другого человека. Однако полученные данные не доказывают причастность к этому зеркальных нейронов, если они вообще существуют в областях головного мозга, регулирующих эмоции.

Разум формирует человека, а человек — разум; но взаимоотношения между умами так до конца и не исследованы

Зеркальные нейроны быстро стали актуальным предметом изучения, но результаты исследований по-прежнему противоречивы: наряду с публикациями, свидетельствующими в пользу значимости этих клеток, есть и противоположные.



Возражения многочисленны и разнообразны, но самое убедительное гласит: процесс наблюдения за объектом, вызывающий реакцию в нейроне, задействованном при выполнении наблюдателем тех же действий, не обязательно означает, что исследуемый нейрон отвечает за интерпретацию и понимание действий, поскольку это может быть приобретенная ассоциация с отличающимся применением в головном мозге.

Те же выводы применимы и для активности зеркальных нейронов в эмоциональных состояниях. На сегодняшний день справедливо следующее: эмпатия должна зиждиться на некотором нейронном механизме, определение которого требует дальнейших исследований в этой области.

Любовь слепа

Насколько нам известно, ощущения, щедро даруемые нам любовью, регистрируются в головном мозге через центры, ответственные за фиксацию эффектов нейротрансмиттера дофамина и гормона окситоцина среди прочих сигнальных химических веществ. Связанные с любовью чувства и эмоции играют огромную роль в нашей жизни и задействуют множество различных областей головного мозга.

Причина эволюции указанных чувств — обеспечение воспроизведения рода и эффективное воспитание детей. Бóльшая часть научно-исследовательской работы, сосредоточенной на углублении нейробиологического понимания любви, основывалась на фМРТ, имеющей обычные ограничения относительно неточного сканирования и косвенных выводов об активности областей мозга.

Как изучать любовь? Как известно, красота лица Елены Троянской «сдвигала с места тысячи кораблей», потому начнем именно с лица. Исследование на рубеже тысячелетий отобразило различия в изображениях фМРТ-сканирования при взгляде на фотографию любимого человека или просто друга. Некоторые зоны проявили бóльшую активность при взгляде на фотографию любимого: три — в коре головного мозга и еще несколько — в подкорковых областях. И пусть активных зон было обнаружено сравнительно немного, исследователи указали на их связи с огромным количеством других областей мозга.

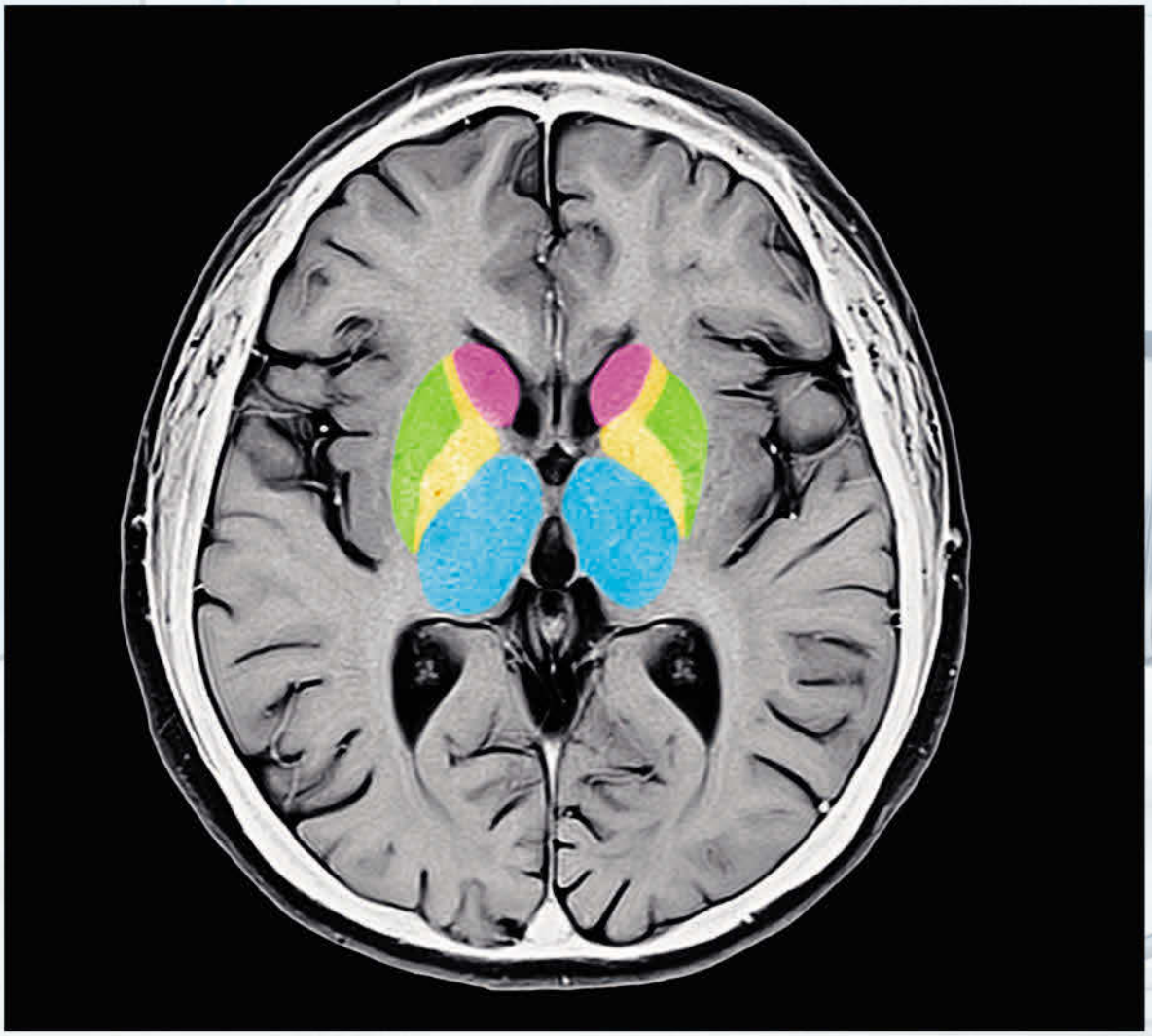
Подобные научно-исследовательские работы демонстрируют закономерную активность в системах, связанных с подкреплением (подробнее см. гл. 9). Пути, сопряженные с отрицательными эмоциями и негативной оценкой других, проявляют меньшую активность у людей, обретших любовь, что подтверждает широко распространенную, однако вовсе не романтическую гипотезу о притуплении критического восприятия чувством любви. Профессор Университетского колледжа Лондона Семир Зеки говорит о том, что нас часто удивляет выбор партнера другими людьми. Мы задаемся вопросом, не потеряли ли они разум. И фактически это действительно так. Любовь зачастую иррациональна, поскольку разум временно отключается.

Привязанность — неотъемлемая часть романтической и родительской любви, которая (в соответствии с фактическими сведениями) связана с разными корковыми нейронными сетями. Материнская любовь сопровождается повышенной активностью в областях, ответственных за распознавание лиц, и нулевой активностью в областях гипоталамуса, отвечающих за половое возбуждение и романтическую любовь. Вместе с тем подавление негативных суждений — обычное явление для обоих видов любви.

Мой бизнес — мое дитя

Человеческая мотивация выходит за рамки удовлетворения базовых потребностей, которые мы, несомненно, разделяем с другими живыми существами. Но стремление ставить перед собой сложные задачи и добиваться их достижения должно иметь аналогичное происхождение. Недавнее финское исследование демонстрирует честолюбие нейробиологов, а возможно, и ограничения, с которым они столкнулись, пытаясь понять сложные социальные феномены, сравнивая родительскую любовь и чувства, которые предприниматели испытывают к основанным ими компаниям.

При помощи анкетирования и сканирования мозга ученые проанализировали чувства 21 отца и 21 бизнесмена (женщины-предприниматели не участвовали в исследовании). МРТ-сканирование использовали для сравнения областей с повышенной активностью при рассмотрении фотографии своего ребенка или любого другого, с которым нет родственных связей. Фото компании (как фото ребенка)



Согласно этому исследованию, расположенное в базальных ганглиях хвостатое ядро (заштрихованная зона) связано чувствами предпринимателей по отношению к своей фирме и к детям

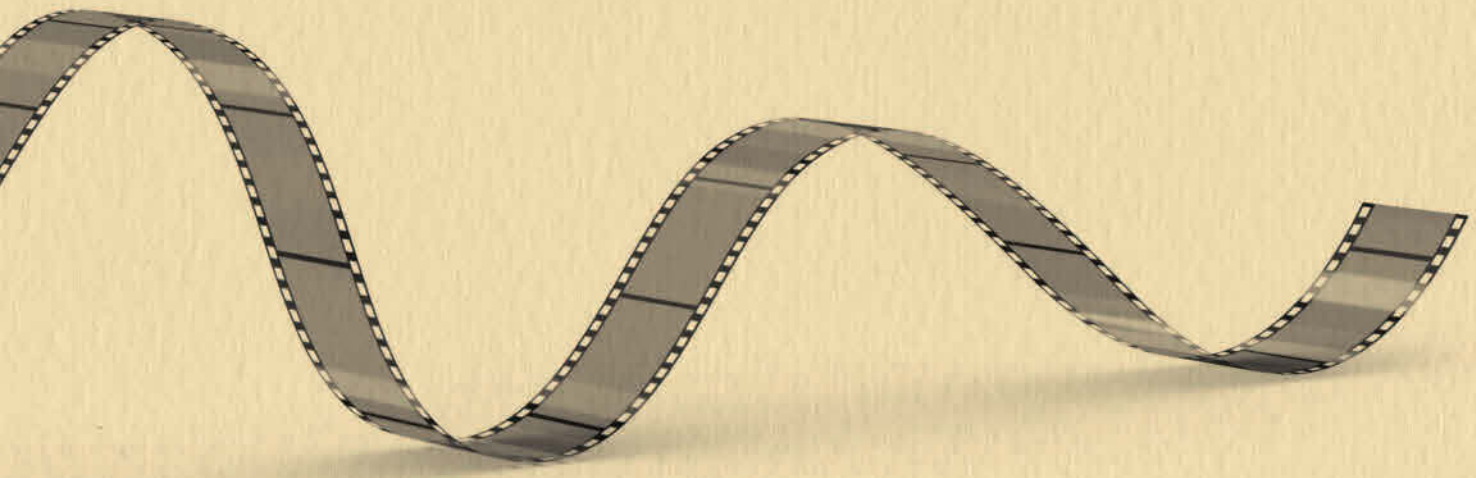
сделать невозможно, поэтому в сравнительном анализе рассматривались логотипы собственной компании испытуемого и другой (*неконкурентной*!) компании.

И в самом деле, в определенном наборе нейронных сетей регистрировалось увеличение активности и в случае с собственным ребенком испытуемого, и в случае с собственной компанией. Сопоставительный анализ снимков отразил схожую дезактивацию в областях, относящихся к социальной оценке других людей. Исследователи предполагают, что любовь слепа в обоих случаях: так же как родители могут потворствовать своим детям, предприниматели могут чрезмерно оптимистично смотреть на результаты деятельности своих молодых компаний (рассмотренным компаниям было в среднем 4,5 года).

Таким образом, мы получили научное подтверждение уже давно известному факту: люди привязываются к проектам, в которые они вложились, и испытывают гордость в случае успеха. Раскрывает ли данное исследование нечто большее? Следует ли потенциальным инвесторам запрашивать МРТ-сканирование *хвостатого ядра* учредителя компании, чтобы убедиться в серьезности его намерений? Многие другие зоны головного мозга фигурировали в научных работах на тему реакции родителей на детей: большинство из них были сосредоточены на изучении матерей. Часть исследования о «любви предпринимателей», сконцентрированная на фиксации эмоций, задействованных в мире бизнеса, несколько преувеличена; а что касается инвесторов, существуют другие, более разумные способы оценки новой авантюры.

Глава 7

МЫ СОСТОИМ ИЗ ВОСПОМИНАНИЙ



Механизм памяти

Когда прибор для проверки зрения направляет струю воздуха прямо в глазное яблоко, мы невольно вздрагиваем, хотя процедура нам хорошо известна. Избегание опасности для глаз — мощный рефлекс. Если бы струю воздуха сопровождал предварительный характерный звук, мы стали бы вздрагивать от него.

Первым условный рефлекс изучил известный советский физиолог Иван Петрович Павлов: он обнаружил выделение слюны у собаки при звуке колокольчика.

Попробуйте применить подобный тест со струей воздуха и звуком на человеке с отсутствующим или сильно поврежденным гиппокампом — и вы заметите у него ту же рефлекторную реакцию. Ключевая разница заключается в том, что он не будет помнить о самой процедуре, однако нервная система «запомнит» звук, предвещающий дуновение воздуха.

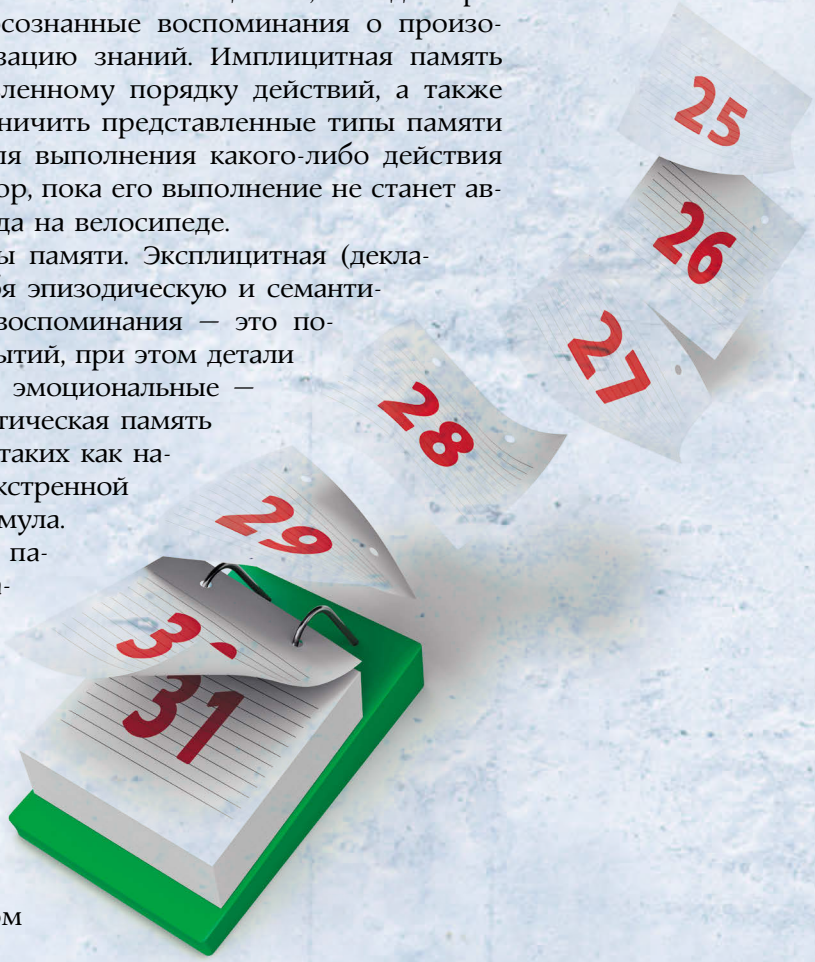
Процесс кодировки происходящих событий служит доказательством того, что запоминание не ограничивается одним процессом. Наш мозг обладает несколькими механизмами для усвоения новой информации в том виде, в котором она может понадобиться нам в будущем. Воспоминания, по кусочкам составляющие нас как личность и позволяющие нам управлять нашей жизнью, отличаются от тех воспоминаний, которые лежат в основе изученных навыков или приобретенных рефлексов.

Существуют различные типы памяти. Эксплицитная, или декларативная память подразумевает осознанные воспоминания о произошедших событиях или актуализацию знаний. Имплицитная память относится к навыкам и установленному порядку действий, а также страхам и тревоге. Четко разграничить представленные типы памяти нельзя, поскольку изначально для выполнения какого-либо действия требуется осознанность до тех пор, пока его выполнение не станет автоматическим, как, например, езда на велосипеде.

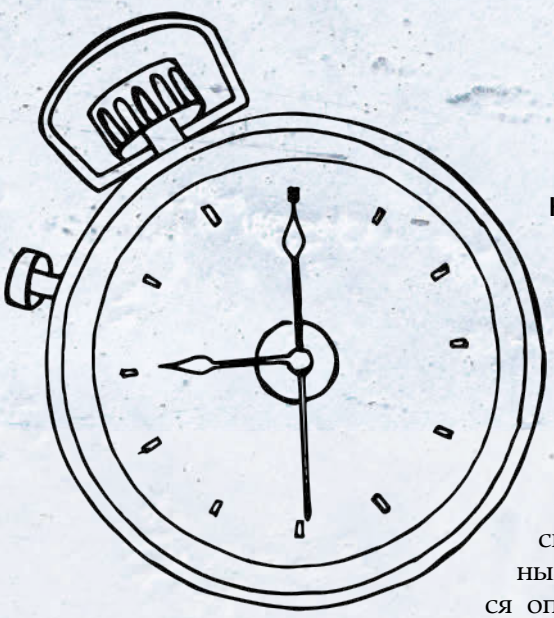
Существуют и другие подвиды памяти. Эксплицитная (декларативная) память включает в себя эпизодическую и семантическую память. Эпизодические воспоминания — это повторение в памяти прошлых событий, при этом детали прошлого опыта — сенсорные и эмоциональные — вновь собираются вместе. Семантическая память касается общеизвестных фактов, таких как названия столиц, номер телефона экстренной службы или математическая формула.

Существуют классификации памяти относительно времени. Рабочая память — это своего рода «электронный блокнот», где содержится информация, необходимая для незамедлительного использования в данный момент. Кроме того, есть кратковременная и долговременная память, при этом первая долгое время считалась необходимым предварительным этапом для формирования второй.

Прошлое уходит в забытье, но не целиком и не с одинаковой скоростью



Память не ограничивается одним процессом

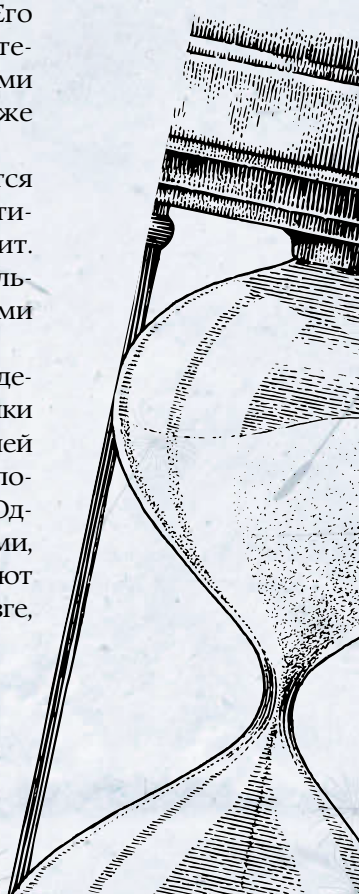


КАК ВСЕ УСТРОЕНО?

Ученые разрабатывают великолепные теории о механизмах памяти. В этих теориях рассматриваются области головного мозга, необходимые для каждого типа памяти, а также взаимодействие этих областей и непосредственно хранение самих воспоминаний. Теоретический пласт в большей степени охватывает формирование воспоминаний, нежели способ их воспроизведения в памяти в нужный момент. Воссоздание в памяти имеющегося опыта — декларативная часть эксплицитной памяти — щекотливый вопрос для изучения. В результате слаженной работы внешних стимулов образуется воспоминание. Его актуализация в памяти, помимо действия определенных раздражителей, в основном предполагает оживленный диалог между разными областями головного мозга, что усложняет процесс разработки даже самых простых экспериментов.

Согласно наиболее признанной теории, информация кодируется в головном мозге посредством изменений синапсов и силы синаптических связей. У нас есть предположение, как именно это происходит. Существуют прямые доказательства, что данные процессы обязательны для некоторых видов обучения; а вот являются ли они ключевыми для всех аспектов памяти, уже не столь очевидно.

Человеческая память кажется особенной. Мы можем говорить о декларативной памяти, а наша способность приобретать новые навыки превосходит таковую у всех остальных живых существ. Емкость нашей памяти должна быть ограниченной, но все же она крайне велика, как показывают результаты некоторых людей с феноменальной памятью. Однако мы не знаем, обладает ли каждый человек такими возможностями, просто не используя их в повседневной жизни. Также неясно, исчезают ли воспоминания навсегда или и дальше продолжают храниться в мозге, но становятся при этом недоступными для воспроизведения.



НЕИЗМЕННОЕ ПРИСУТСТВИЕ

Генри Молисон приобрел репутацию самого значимого пациента в истории когнитивной нейропсихологии. В 1953 году в попытке излечить эпилепсию 27-летнему мужчине провели расширенную операцию на мозге: ему удалили значительную часть гиппокампа в обоих полушариях. Припадки прекратились… как в некотором смысле и его жизнь.

После операции у Генри перестали формироваться долговременные воспоминания. Изменения не затронули интеллектуальные способности и личность, также он мог вспоминать события из своей жизни до хирургического вмешательства. Но из того, что происходило после, почти ничто не сохранилось в его долговременной памяти. Для Молисона (фигурировавшего в научных публикациях как «пациент Г. М.» вплоть до своей смерти в 2008 году) время остановилось: мысленно он все время находился в 1953 году.

Мозг пациента Г. М. был заморожен и разрезан на ультратонкие срезы, которые впоследствии были заархивированы

Случай Молисона активно изучался и существенным образом противостоял превалировавшей точке зрения о сосредоточении воспоминаний в разных частях головного мозга. Последствия огромного очага повреждения привлекли внимание исследователей к участию гиппокампа в формировании долговременной памяти. Доказательства были неявными, поскольку хирург также удалил некоторые прилегающие области, которые, согласно недавним сведениям, также участвуют в обработке информации. Помимо этого, в ходе операции было повреждено множество главных нервных путей.

Тем не менее рассмотренные впоследствии случаи людей с меньшими повреждениями гиппокампа демонстрируют похожие, хоть и менее серьезные нарушения памяти. А пациент Г. М. с самой большой областью поражения страдал самой сильной амнезией.

Сьюзан Коркин

Он смог обучиться новым моторным навыкам, однако в силу всеобъемлющей блокировки декларативных воспоминаний не мог вспомнить, как он им обучился. Он не узнавал собственное лицо в зеркальном отражении при пробуждении и каждый раз заново знакомился с исследователями, которые работали с ним на протяжении десятков лет. Исследователь из Массачусетского технологического института Сьюзан Коркин процитировала в своей книге «Неизменное настоящее время» его слова: «Забавная вещь — человек живет и все время чему-то учится. Я просто живу, а вы учитесь».

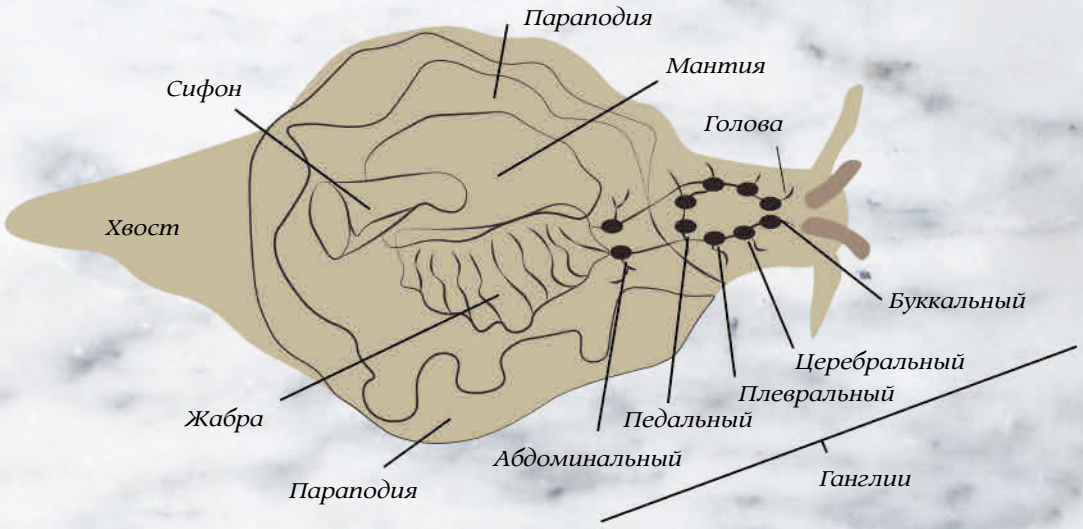
Пациент Г. М. появился в тысячах научных работ, прежде чем умер. Столь информативное исследование данного случая может выступать в качестве завещания последующим нейробиологам, а также бесценным вкладом в науку и признаком того, как мало требовалось для изучения человеческой памяти. Мозг Генри Молисона в настоящее время хранится в 2401 оцифрованном срезе, который был сделан в лаборатории Сан-Диего для дальнейшего микроанатомического исследования.

Эрик Кандель

От заметок до исследований: не стоит усложнять

Какой бы простой нам ни казалась жизнь морского моллюска аплизии, ей все же приходится по-своему обучаться и запоминать. Прикоснитесь к одной из жабр — и аплизия рефлекторно втянет ее. При регулярном воздействии на жабры подобную защитную реакцию можно сделать менее выраженной; но также можно и усилить ее при использовании электрических разрядов в непосредственной близости.

В начале 1960-х годов американские исследователи Эрик Кандель и Алден Спенсер утверждали, что если процесс обучения зависит от модификации межклеточных взаимодействий (*синаптической пластич-*

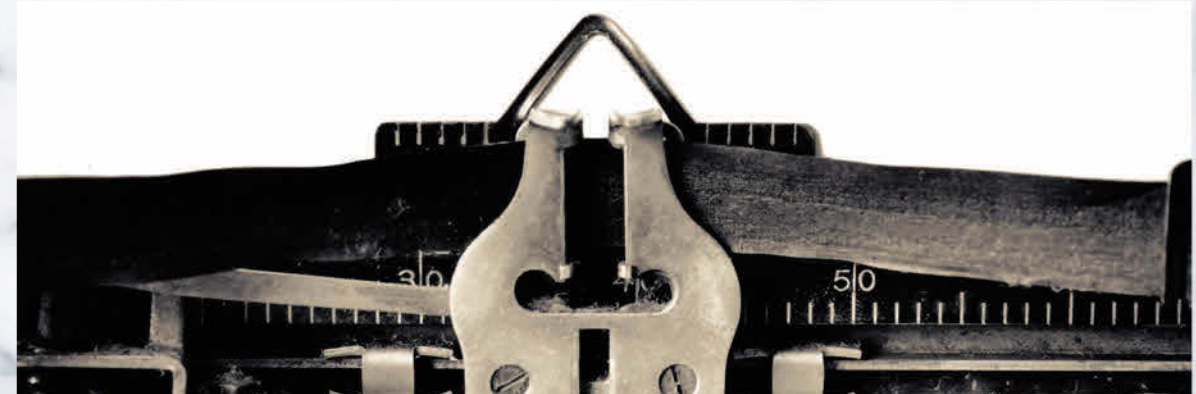


ности), то будет проще проводить исследования на аплизии, чем на живых существах с более сложным строением. Ученые пытались исследовать гиппокамп млекопитающих, но не сильно преуспели. Аплизия же обладает небольшим количеством невероятно больших нейронов (всего 20 000), а изменения в реакциях затрагивают менее 100 из них.

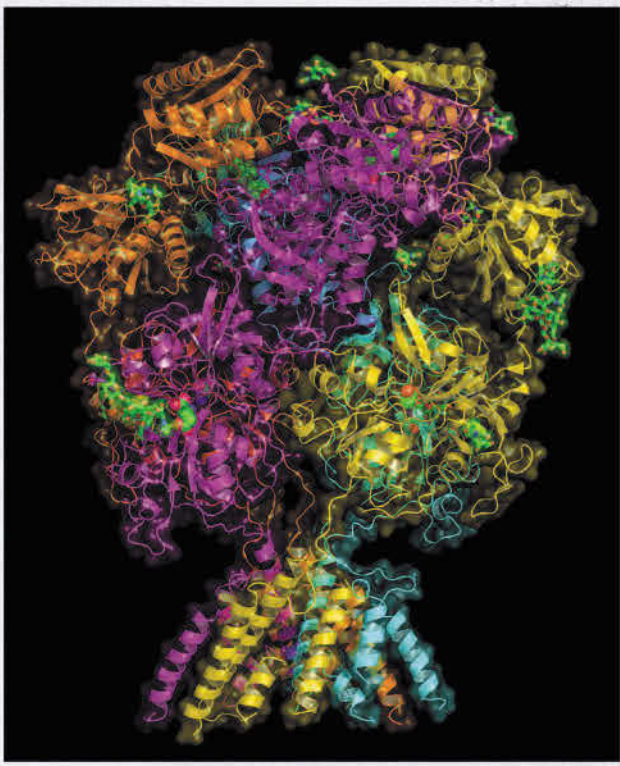
Ученые проводили синапсирование одного сенсорного нейрона с одним моторным в лабораторной чаше. Острожные электрические и химические воздействия пролили свет на процесс обучения маленького моллюска. При возбуждении нейрон высвобождает в синапс нейротрансмиттер *глутамат*. Поскольку с каждым последующим импульсом глутамата выходит все меньше, следующая клетка системы получает менее сильный сигнал.

Когда аплизия испытывала шок, сигнал, напротив, становился сильнее с помощью обходного пути. Первый нейрон получает от другого аксона нейротрансмиттер *серотонин*, который быстро активизирует фермент, вызывающий небольшие изменения в структуре белков и модифицирующий ионные каналы в клеточной мембране. В более долговременной перспективе этот же тип ферментов активизирует так называемый фактор *CREB*, который «включает» определенные гены в клеточном ядре. Это вызывает более сильные изменения в синапсе и приводит к формированию новых синапсов между одной и той же парой клеток. Процесс завершается изменениями постсинаптической клетки, создавая более прочную и продолжительную связь.

Изучение проблемного вопроса на простой модели — стандартный, однако далеко не всегда столь результативный метод научного анализа в биологии. Эрик Кандель, ставший лауреатом Нобелевской премии по физиологии и медицине в 2000 году, описал свое увлечение аплизией как «прыжок в неизвестность, за который я был вознагражден выше моих самых заветных надежд».



Детектор совпадений



Эту 3D-модель одного типа NMDA-рецептора, созданную в Лаборатории в Колд Спринг Харбор, сравнивают с воздушным шаром. Глутамат связывается с областью на «шаре» снаружи клетки. «Корзина» же, расположенная ниже, находится внутри клетки

При работе со столь сложными системами, с которыми приходится иметь дело нейробиологам, помогает знание конкретного предмета поиска. Результаты исследования аплизии быстро привели к обнаружению аналогичных изменений нервной системы у других видов, включая млекопитающих.

В центре событий — особый тип постсинаптического рецептора — *NMDA*-рецептор, связывающий *N*-метил-*D*-аспартат. Эта молекула действительно прикрепляется к нему, но в клетке рецептор реагирует на глутамат. *NMDA*-рецептор представляет собой ионный канал, который при обычных условиях заблокирован ионом магния и открывается, если клетка, в которой он находится, деполяризуется большим количеством синаптических сигналов либо от нескольких входящих синапсов, либо от частоты повторов потенциалов действия. Синаптические сигналы также способствуют возбуждению потенциала действия в принимающей клетке. Такая комбинация превращает *NMDA*-рецептор в детектор совпадений, который фиксирует одновременное возбуждение связанных между собой нейронов.

Разблокировка ионного канала *NMDA* запускает входящий в клетку поток ионов кальция, а затем происходит каскад клеточных событий, которые усиливают и реконструируют синаптическую связь между двумя клетками. Вся эта последовательность носит название «*долговременная потенциация*». Ключевым этапом является активация определенного гена фактором *CREB* — той же самой молекулы,

Долговременная потенциация

что была найдена в аплизии. Как и в системе аплизии, реакция на изменения *NMDA* имеет быстрые и медленные компоненты, причем последние зависят от действия генов.

Следует учитывать и такие нюансы, как направление молекул, образованных свежеактивированными генами, для воздействия только на те синапсы, которые были маркированы на «укрепление» — в противном случае усилилось бы каждое соединение клетки. Совсем недавно была установлена роль *CREB* в связывании воспоминаний об отдельных событиях путем выбора связей между нейронами, отвечающими за расшифровку воспоминаний для закрепления. Это один из механизмов укрепления синаптических соединений — ключевой этап многих видов обучения и запоминания на протяжении всей жизни.

На сегодняшний день это один из лучших примеров в клеточной нейробиологии с глубоким пониманием процессов на молекулярном уровне, а также запоздалое доказательство теорий канадского психолога Дональда Хебба. В своей книге «Организация поведения» (1949) ученый выдвинул гипотезу о базовых аспектах процесса обучения: «Если аксон клетки *A* находится достаточно близко, чтобы возбуждать клетку *B*, и неоднократно или постоянно принимает участие в ее возбуждении, то наблюдается некоторый процесс роста или метаболических изменений в одной или обеих клетках, ведущий к увеличению эффективности клетки *A* как одной из клеток, возбуждающих клетку *B*». Другими словами, совместное возбуждение клеток говорит об их взаимном соединении. Система рецепторов *NMDA*, по-видимому, делает именно это, и соединения, которые обладают этими рецепторами, называются *синапсами Хебба*.

Кристаллы чистого NMDA

МЫШЬ С ПАМЯТЬЮ СЛОНА

Точно так же, как повреждения головного мозга способствуют локализации областей, связанных с определенными функциями, удаление ключевой молекулы может способствовать раскрытию ее роли в клетке. Разница заключается в том, что при работе с молекулами всегда можно организовать и их избыток, а не только недостаток.

Большинство нейробиологов в своих исследованиях прибегают к использованию генетических манипуляций (как правило, на мышах). В 1999 году исследователь Джозеф Цянь и его коллеги из Принстона продемонстрировали, что добавление дополнительных копий гена NMDA-рецептора резко улучшает способность мыши к запоминанию.

На тот момент ученый уже знал, что снижение производства NMDA-рецептора усложняет процесс обучения, а по мере старения животного становится все сложнее активировать рецепторы. Мышь с повышенным количеством рецепторов этого типа подтвердила его значимость в устройстве памяти: в ходе выполнения простых заданий она демонстрировала улучшенную способность к запоминанию, например отдавая предпочтение изучению нового объекта, нежели уже обследованного ранее.

Вести о мыши по кличке Дуги, названной в честь невероятно умного персонажа из телевизионного сериала того времени, облетели весь мир и породили надежду на появление лечения от провалов в памяти. Однако последующее выявление сопутствующей обостренной чувствительности к хронической боли у мыши погасило энтузиазм ученых. Как лекарство форсирование генов — неудачный инструмент для воздействия на сложные ткани с миллиардами клеток, где одна и та же молекула участвует во множестве различных действий.

Джозеф Цянь с одной из его подопытных мышей

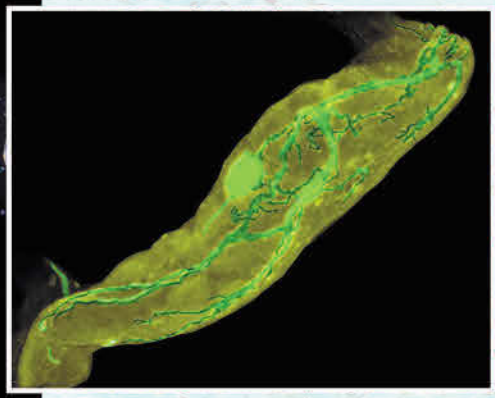
От нейротрансмиттеров до нейромодуляторов

Изучение аплизии проложило путь к пониманию того, как наличие двух нейротрансмиттеров может расширить возможности нейронного действия. Система *NMDA* обладает похожими признаками, которые достаточно легко обобщить.

Тем не менее модель системы другого морского организма помогла отразить всю сложность возможных изменений в действии нейрона. В конце 1960-х годов профессор Брандейского университета Ив Мардер начала работать над простыми нейронными цепями, контролирующими сокращения живота лобстеров и крабов. Вскоре исследовательница обнаружила, что в отдельной цепи из 30 нейронов снова присутствуют два нейротрансмиттера — глутамат и ацетилхолин — и что они оказывают разное влияние в зависимости от локальных клеточных условий.

Более поздние работы показали, что множество других молекул воздействуют на выходные сигналы от отдельных нейронов и нейронных цепей и могут быть использованы для экспериментальных манипуляций. В лаборатории Ив Мардер на данный момент насчитывается 27 различных циркулирующих гормонов, которые могут влиять на одни и те же нейроны, и еще 27 «местных нейромодуляторов», включая нейротрансмиттеры и некоторые другие недавно открытые молекулы, образованные соседними нейронами. Это дает простой сети огромные возможности для тончайших изменений активности. По мнению Ив Мардер, тонкая нейромодуляция является нормой, а не исключением и в более сложных нервных системах. В сравнении с нейротрансмиттерами нейромодуляторы в основном действуют медленно, однако оказывают сильное влияние на вероятность реакции нейронов на дендритный входной сигнал или сигналы — насколько они возбудимы — и на количество высвобождаемого нейротранс-

Лобстер на стадии личинки



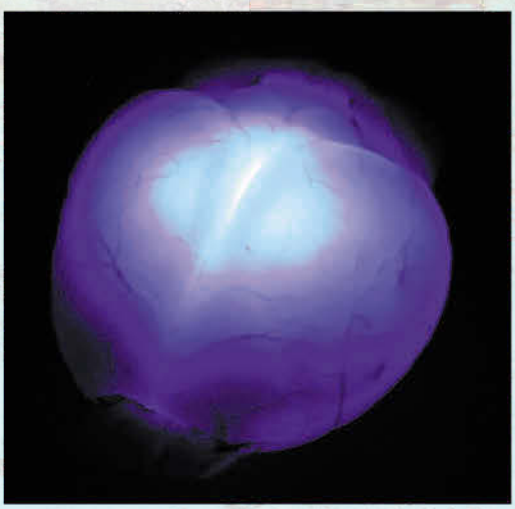
Один из нейронов ганглия, контролирующего живот лобстера

миттера при возбуждении, а также на паттерн возбуждения. Все это, помимо основных элементов *NMDA*-системы, дополняет картину нейропластичности, позволяя нейронным цепям задавать более быстрый темп, чем могли себе представить исследователи.

Все бы ничего, но головному мозгу необходима и стабильность. Главная цепь в желудочно-кишечном тракте лобстера поддерживает ритм определенного паттерна (как, например, ритм ходьбы или дыхания), который остается неизменным. Последующая разработка теории, комбинирующей управляемую компьютером подачу сигналов сгенерированных нейронов и компьютерное моделирование нейронных сетей, раскрыла, каким образом цепи продолжают поддерживать один и тот же выходной сигнал даже при различных изменениях отдельных нейронов. Таким образом, одни и те же механизмы обеспечивают и пластичность, когда она необходима, и стабильность.

Эти клетки знают, но не говорят

Нам удалось выяснить, как происходит усвоение огромного количества воспоминаний и где они обрабатываются. Однако вопрос об их хранении и извлечении по-прежнему остается открытым. К тому же мы можем заблуждаться относительно вещей, которые на первый взгляд кажутся нам понятными.

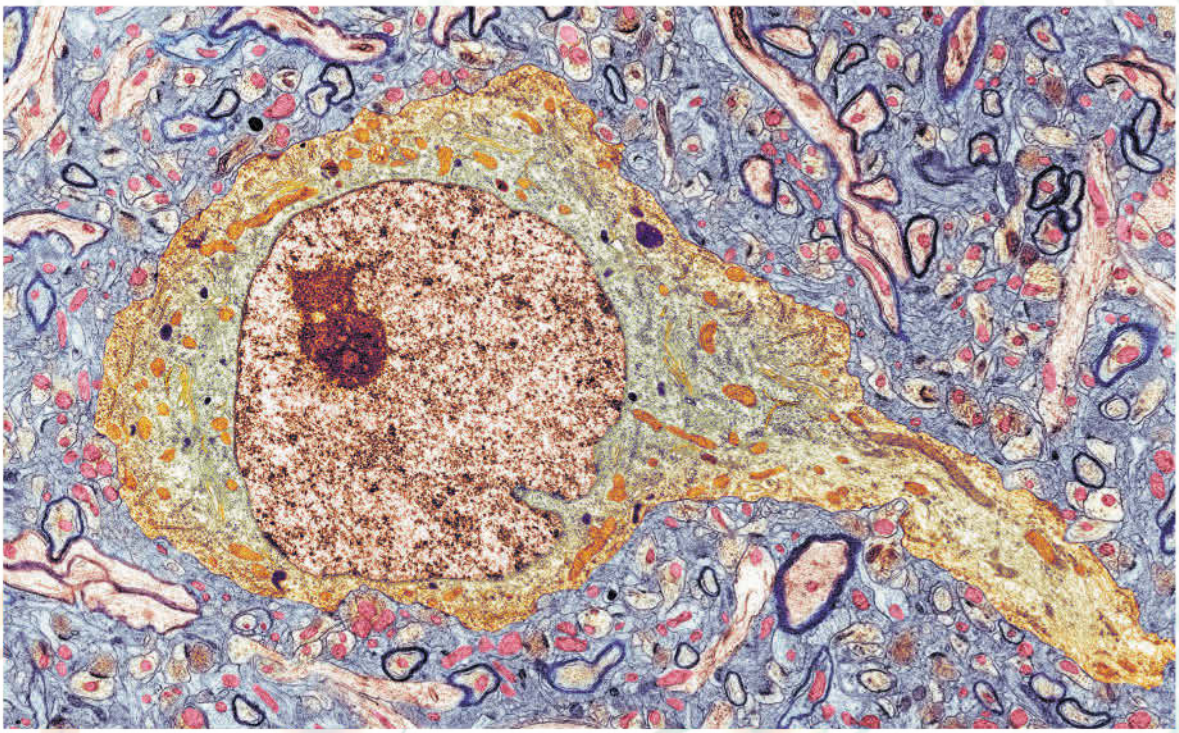


Крошечный светодиодный индикатор в головном мозге мыши может активизировать сенсибилизированные нейроны

Одна из таких вещей — связь между кратковременной и долговременной памятью. Подобное разделение похоже на правду: многие вещи мы удерживаем в памяти в течение нескольких дней или недель, но только незначительная их часть становится теми воспоминаниями, которые доступны в течение всей жизни. Представление о том, что долговременная память представляет собой набор воспоминаний, изначально хранившихся в кратковременной памяти (двухэтапный процесс), пошатнулось в 2017 году.

Исследователи из Токио под руководством Такаши Китамура использовали оптогенетику для установления времени активации воспоминаний в разных частях головного мозга мыши. В гиппокампе и коре головного мозга ученые нашли клетки, которые кодируют следы воспоминаний, образованных при помощи удара тока. Однако клетки в обоих областях оставались и через день, что противоречило гипотезе о накоплении кратковременных воспоминаний в гиппокампе и их дальнейшей передаче в префронтальную кору для длительного хранения и последующего извлечения.

Ученые пришли к выводу, что кратковременные и долговременные воспоминания закладываются одновременно. До момента проведения эксперимента ученые не могли вывести подобную гипотезу, поскольку кортикальную память можно обнаружить только в мо-



Одиночный нейрон гиппокампа

мент ее активации путем включения оптогенетического переключателя в задействованных нейронах.

Расширенные наблюдения продемонстрировали, что изначально «молчащие» клетки памяти в коре головного мозга созревают и становятся активными спустя примерно две недели, а клетки гиппокампа, наоборот, постепенно «замолкают». При этом экспериментаторы все еще могли активировать их, что говорит о том, что следы кратковременной памяти сохранялись.

В исследовании также удалось установить участие клеток части миндалевидного тела, которая сохраняет некоторые аспекты события — начальный шок — и связана как с корой головного мозга, так и с гиппокампом.

Если гипотеза подтвердится, это может привести к грандиозному пересмотру теорий о формировании и разделении памяти.

В поиске энграммы

Усиление синаптических связей является вероятным решением основной проблемы нейробиологии памяти, сформулированной еще в 1904 году немецким ученым Рихардом Земоном. Согласно ему, память индивида должна оставлять физический след в головном мозге — так называемую ***энграмму***. Основное достоинство этого термина заключается в его абстрактности без привязки к конкретному объекту, который он означает. Ученые выступали с разными предположениями — от молекул и резонирующих цепей до популярной в 1970-х годах теории о голограммах.

Изменения в мозге, отражающие воспоминания, должны иметь свойства, аналогичные самим воспоминаниям. Они долговечны, изысканно избирательны, порой обратимы и довольно легкодоступны — иногда осознанно, иногда нет. Хорошим подспорьем выступают разные способы укрепления синапсов. Можно идентифицировать отличительные знаки маркировки на синапсах для их дальнейшего усиления. Существуют также комплементарные процессы ослабления или полного разрушения синаптических связей, поэтому усиление синапсов не выходит из-под контроля.

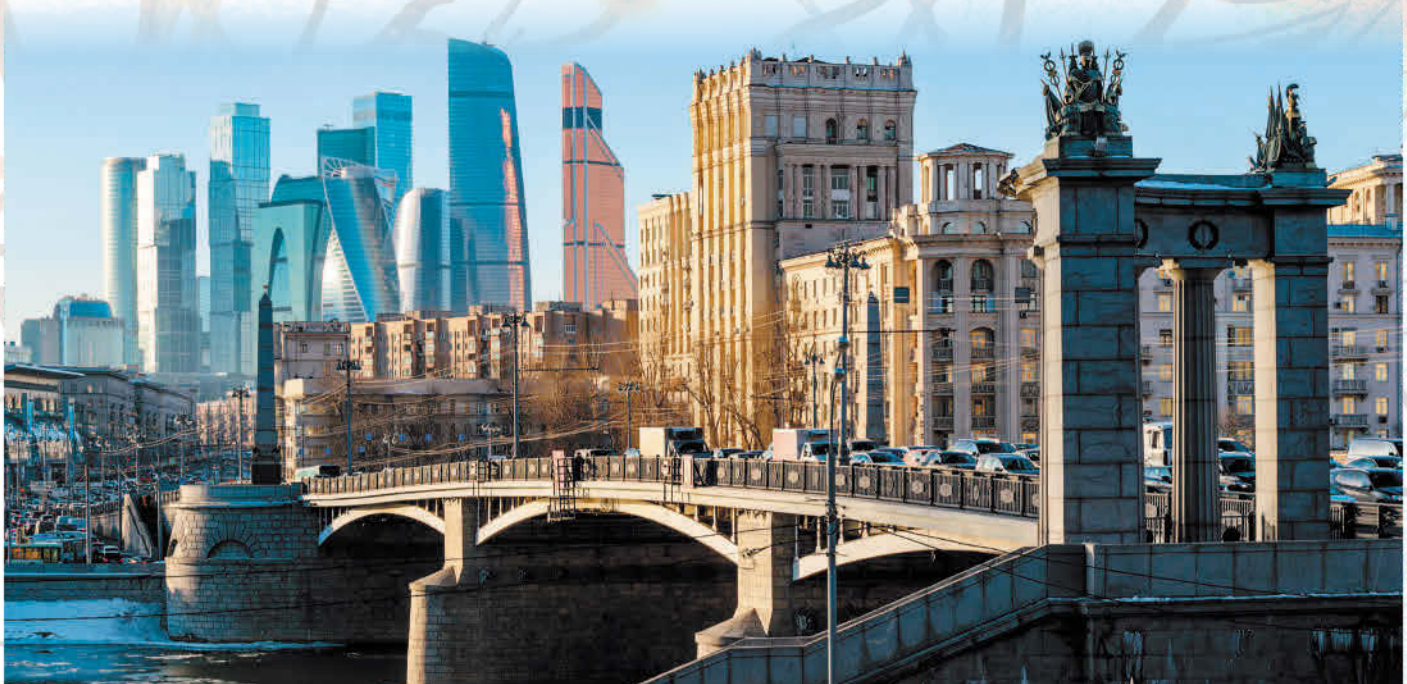
Большинство современных представлений о памяти начинаются с паттернов возбуждения нейронов и изменений симпатических связей с постоянными отсылками к «клеткам энграммы» и их непосредственной взаимосвязи с извлечением воспоминаний. Все же не стоит упускать из виду следующие важные моменты: долговременная память может нуждаться в конкретных изменениях в шипиках дендритов и их многочисленных синапсах. Существует также гипотеза о том, что синаптические изменения играют важную роль в извлечении воспоминаний, однако не ключевую в сохранении информации.

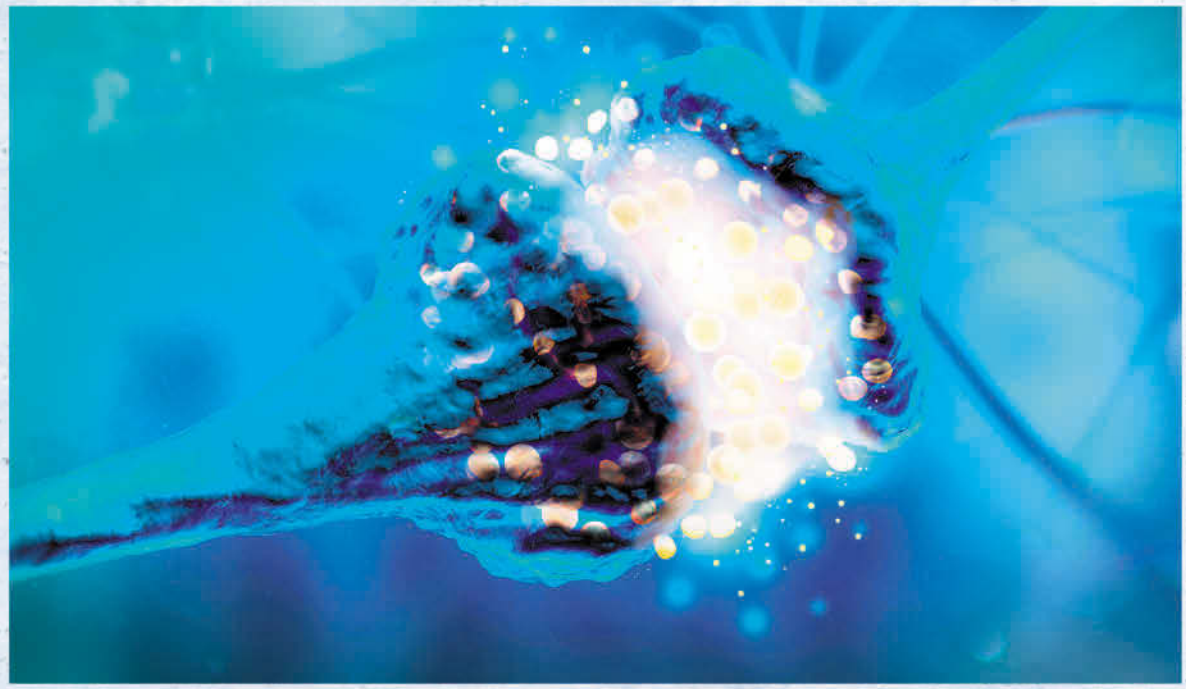
Некоторые теоретики все еще сосредотачиваются на изучении других частей нейрона. По мнению некоторых ученых, для сохранения воспоминаний необходимы *эпигенетические изменения* (небольшие модификации ДНК). Короткие генетические сообщения в виде молекул РНК, транскрибируемых с ДНК, могут передаваться от одних нейронов к другим или даже между нейронами и глиальными клетками. Обнаружение новых нейронов в гиппокампе присоединяется к остальному — образованные ими синапсы по определению являются новыми. И фактическая частота нейронного возбуждения — паттерн отправляемых по аксону импульсов — может иметь значение при воспроизведении хранимых воспоминаний.

Итак, является ли энграмма набором синапсов, взаимосвязанным множеством клеток, паттерном нейронного возбуждения или же по старинке молекулой(-ами)?

В составе энграммы не исключается участие белков и даже ДНК. Однако большинство молекул и клеток постоянно замещается и обновляется, поэтому любая теория должна предоставить объяснение

При перестройке города карта улиц, как правило, остается неизменной: другой вид памяти?





Секрет памяти скрывается в синаптических связях, но, возможно, не только там

тому, каким образом долговременные воспоминания сохраняются на протяжении целых десятилетий. Должно быть, поддерживается некий паттерн, подобно тому как по частям постоянно перестраивается город. Возможно, это стрежневая структура, на которой расположены синаптические рецепторы? Или что-то, связанное с расположением микротрубочек внутри нейронов? Сложно найти какой-либо аспект микроструктуры головного мозга, который еще не успели выдвинуть на роль хранилища памяти. Последний кандидат — структурное изменение в *перинейрональной сети* (данный термин введен для обозначения огромного множества связанных молекул внеклеточного матрикса, заполняющего крошечные пространства между клетками головного мозга). Возможно, когда-нибудь ученым удастся представить общую теорию памяти, заключающую в одну систему все вышеперечисленные комбинации.

«Если бы ваш мозг действительно работал так, как мыслит большинство людей, он бы сварился за минуту»

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ПАМЯТЬ?

Сложность фокусировки на нейронной связи и последовательности импульсов, передаваемых по аксонам как по основному механизму доступа к воспоминаниям, заключается в необходимости высоких энергозатрат.

Профессор Университета Рутгерса Чарльз Галлистел утверждал, что память как информационная система должна уметь вычислять и учитывать количество энергии, необходимой в случае изменения паттерна возбуждения аксона и вытекающих из нее трансформаций. «Если бы мозг занимался вычислениями так, как об этом думает большинство людей, он бы закипел в течение минуты», — утверждает ученый. Какова же альтернатива? Молекулы. По его словам, «выполнение вычислений при помощи химических реакций гораздо менее затратно».

Если говорить более формально, вычисления происходят внутри клеток головного мозга «в исполнении внутриклеточной химии нервных процессов, оперирующей архивированной в клеточном механизме информацией». Однажды мы увидим, что память «представляет собой ген, в котором сосредотачивается весь опыт». Сейчас это мнение разделяют немногие, однако исключать его пока рано.

Запоминание или воссоздание?

Как известно, для эффективной работы памяти необходимо компромиссное решение. Мозгу приходится находить способы сохранения информации с использованием элементов, подверженных постоянному изменению. Молекулы белка разрушаются и обновляются. Синаптические соединения перестраиваются. Нейроны зачастую стабильны, чего не скажешь об их связях.

И все же воспоминания упорно сохраняются. Взрослые люди помнят свое детство примерно с трехлетнего возраста (а некоторые ученые зафиксировали случаи более ранних воспоминаний). Даже кратковременные воспоминания превосходят по длительности большинство происходящих в клетках событий, где 1 мс длится целую вечность.

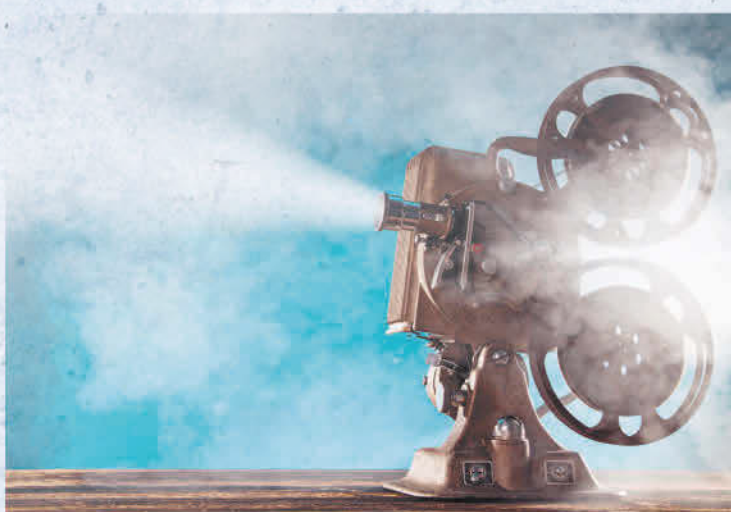
Эти ограничения влияют на то, как мы понимаем хранение и извлечение воспоминаний. Нам известно, что в архивации воспоминаний задействовано огромное количество различных областей головного мозга, и чтобы воссоздать в памяти жизненный опыт прошлого, необходимо собрать воедино все эти отдельные кусочки. В этом случае нейронная активность изменяет некоторые связи для укрепления ассоциаций. Нейропластичность позволяет сохранять воспоминания и в случае необходимости восстанавливать и возвращать их в сознание. С этой точки зрения детальное воссоздание воспоминания предполагает реконструкцию информации, а не просто ее считывание из хранилища. Весь этот процесс можно сравнить с созданием фильма, сюжет которого редактируется после каждого просмотра.

Жизнь в головном мозге кипит со всеми ее химическими и электрическими процессами, и память неизбежно ухудшается. Воспоминания, которые кажутся нам наиболее полными за счет частого обращения к ним, могут стать менее точными, поскольку многократное извлечение нарушает баланс между воспоминанием и реконструкцией.

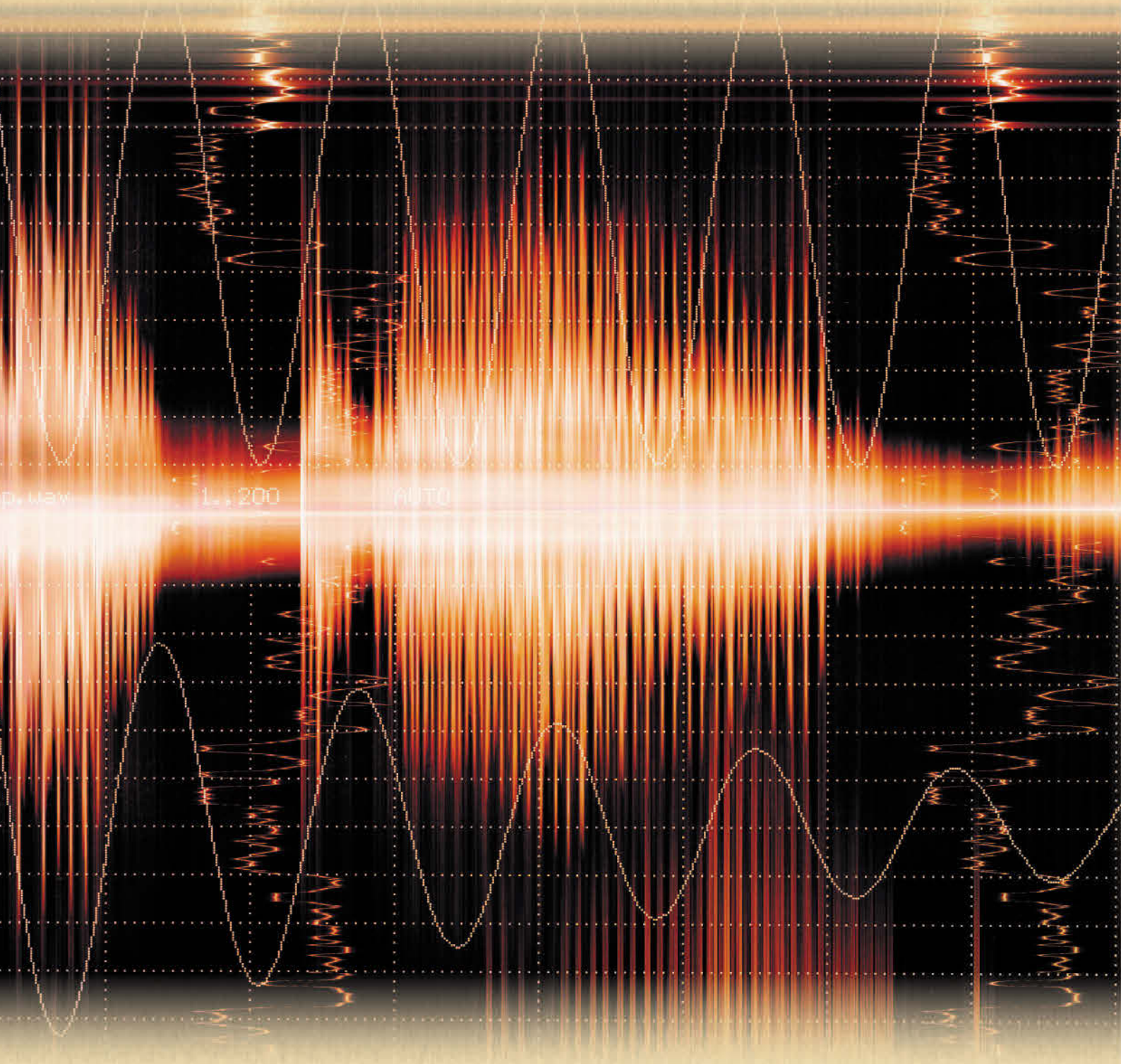
Доказательством этому служат исследования ложной памяти: люди способны декларировать яркие воспоминания, порой о травмирующих событиях, которые на самом деле оказываются их непреднамеренными выдумками. Разграничение подобного самообмана и подлинных воспоминаний, особенно «восстановленных», относительно одного и того же события является важной проблемой.

Может ли наука протянуть руку помощи? Пока что лишь в малой степени. Эксперименты отразили некоторые различия в фМРТ при активированных «ложных» или «истинных» воспоминаниях, однако травмирующие события нельзя воспроизвести в лаборатории.

Исследователи также могут имплантировать ложные воспоминания (гораздо более простого типа) мышам, но при помощи внешнего вмешательства — вживления электрода, — что ограничивает возможность распространения данного метода для понимания того, как это происходит изнутри.



Воспоминания подобны фильму, однако они не хранятся в рамочке на пленке кинозаписи


1:200
AUTO

Глава 8

ЭТА ЗАМЕЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ГОВОРИТЬ

Ноам Хомский

Говорящая обезьяна

Владение языком и речью — одна из самых занимательных способностей головного мозга, присущая только человеческому виду. Представители отряда приматов — шимпанзе и бонобо — могут научиться пользоваться знаками, однако богатая и насыщенная разговорная речь — монополия человека. И хотя слова не всегда в точности передают мысль, мы определенно формируем свои мысли посредством слов.

Исследование нейробиологии языка было необычайно сложным, поскольку изучению подлежит только человеческий мозг. На протяжении многих лет главным источником информации служили повреждения головного мозга; также теоретическую базу подкрепляли психологические эксперименты, электрическая стимуляция, а позднее — сканирование головного мозга и компьютерное моделирование.

Язык не поддается воле человека с первых же дней после рождения: его необходимо изучать, и для этого существует *критический период* (подробнее см. гл. 3). Запрограммированы ли мы для обучения? Господствующая теория, предложенная Ноамом Хомским, гласит, что основы языка — *грамматические структуры* — являются врожденными и неизменными. Эти структуры, по-видимому встроенные в нейронную сеть с момента рождения, обрастают деталями, свойственными конкретному языку определенной культуры.

Несмотря на то что идеи Ноама Хомского нашли широкое признание среди ученых, они не являются общепризнанными. Возможно, речь приобретается посредством способности распознавания общих паттернов, позволяющей растущему головному мозгу обучаться вслед за статистическими ассоциациями. Концепция не затрагивает

В 1970-е годы шимпанзе Ним Чимпский усвоил небольшую часть американского языка жестов

все аспекты изучения языка, однако обладает некоторым преимуществом: это более экономичная теория. Исследования в этом направлении продолжаются, и мы понимаем, как синаптические модификации способствуют обучению.

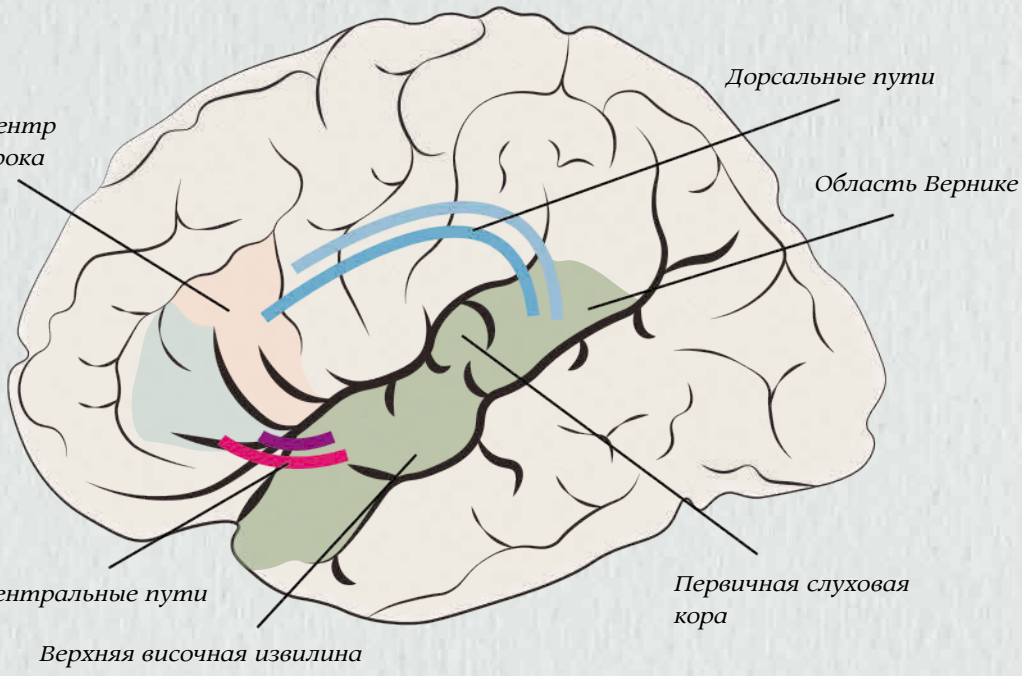
Тем временем исследователи пытаются обнаружить взаимосвязь между пониманием речи и ее производством (как мы преобразуем поток звуков в последовательность обособленных слов и можем произносить вслух собственные мысли, выстроенные в предложения), а также понять, как происходит процесс обучения определенно не врожденным навыкам чтения и письма.

«Быть или не быть?..» Рабочий словарный запас Уильяма Шекспира был крайне велик

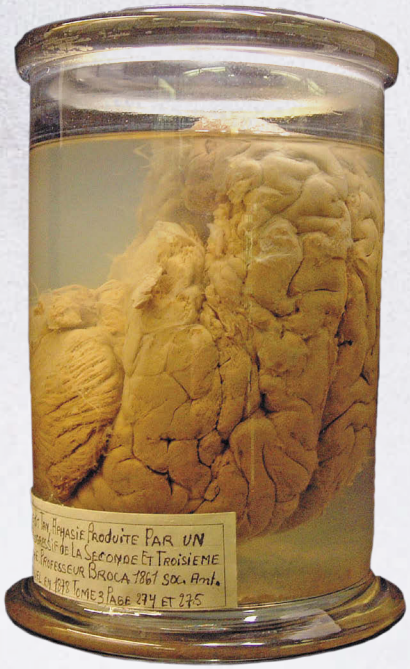
Местопребывание языка

XIX ВЕК — ПЕРИОД, КОГДА НА СМЕНУ ФРЕНОЛОГИИ В КАЧЕСТВЕ ОСНОВЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СЕРОГО ВЕЩЕСТВА на функциональные зоны пришла фактическая анатомия (подробнее см. гл. 1). Именно в это время поражения головного мозга указали на языковые области и послужили началом локализации функций в коре головного мозга.

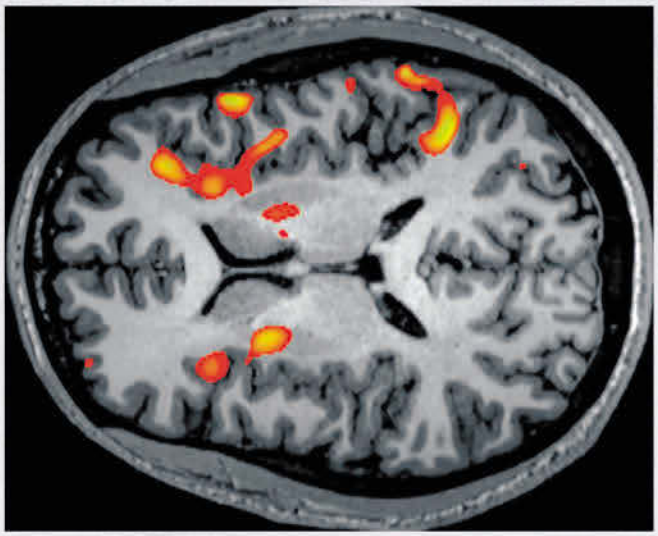
Две кортикальные области, обнаруженные Полем Брока и Карлом Вернике и обычно расположенные в левом полушарии, до сих пор носят их имена, однако их функции уже не рассматривают как однозначные. Например, некоторые люди с повреждениями в центре Брока не страдают афазией Брока, и наоборот. Мозги двух первых пациентов Поля Брока



Обработка языковой информации в головном мозге. Один из двух дорсальных путей (на рисунке заштрихован) участвует в устной речи и соединяет область Вернике и зоны слухового восприятия (обе расположены в верхней височной извилине) с премоторной корой головного мозга. Другой соединяет эти области с центром Брока и отвечает за обработку структур предложений. Вентральные пути играют важную роль в обработке речевой деятельности. Детали устройства различных путей все еще исследуются



Головной мозг одного из пациентов Поля Брока. Даже спустя 100 лет заспиртованный мозг может поведать новую информацию

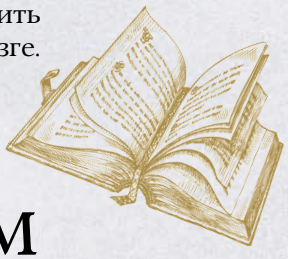


Снимок фМРТ из исследования с завершением предложений

до сих пор находятся в Париже, и в настоящее время была проведена их диагностика при помощи МРТ. Снимки отобразили повреждения в других областях головного мозга, а также нарушения важных нервных путей.

В процессе тщательного изучения пациентов, большинство из которых перенесли инсульт с частичной или полной утратой языковых способностей, было собрано достаточное количество деталей о маленьких областях головного мозга, участвующих в восприятии речи на слух и говорении.

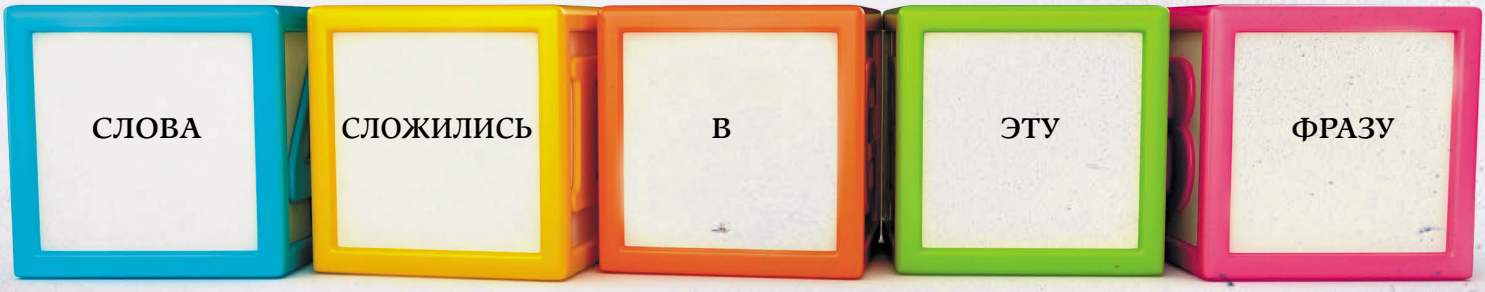
При совмещении сведений в общих чертах получится обозначить главные связи обработки языковой информации в головном мозге. Структура выглядит следующим образом.

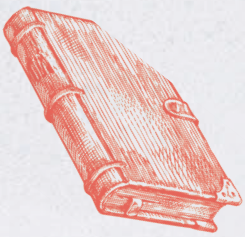


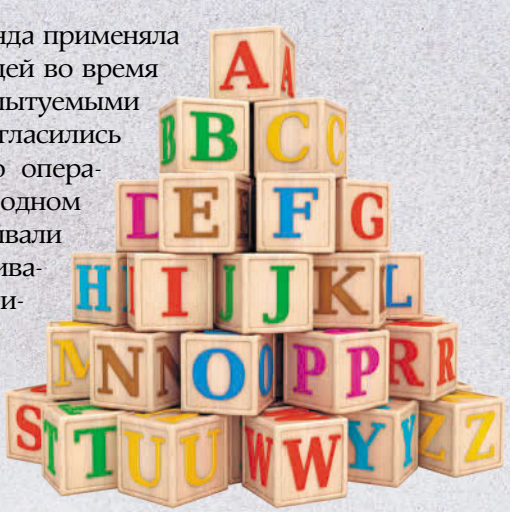
От слов к предложениям

Изучение головного мозга и языка довольно долгое время было в основном анатомическим. Технический прогресс позволил ученым более детально изучить обработку языковой информации и обогатил новыми фактами не только саму науку о головном мозге, но и нейролингвистику.

В 2017 году был опубликован яркий пример, который вывел нейробиологию за пределы простого распознавания слов к следующему языковому этапу. На этом этапе смысл выводится из целого ряда слов в фактически неограниченном количестве предложений.







В ходе исследования франко-американская команда применяла электрическую запись изнутри головного мозга людей во время прочтения ими серии тестовых предложений. Испытуемыми стали страдающие от эпилепсии люди, которые согласились на вживление электродов в языковые области до операции по улучшению их состояния. Затем на своем родном языке (английском или французском) они прочитывали предложения, длина которых постепенно увеличивалась (на одно слово за раз), пока исследователи регистрировали активность их головного мозга.

При добавлении слова отмечалась повышенная активность в языковых областях головного мозга. Самое же интересное происходило в момент составления законченной фразы из отдельных слов.

Под структурой предложения психологи понимают разбиение слов на группы, объединение которых происходит в соответствии с грамматическими правилами составления фраз. В данном эксперименте активность головного мозга падала каждый раз, когда слова можно было объединить для построения фразы, а затем снова поднималась, когда появлялось больше слов.

Смысл заключается в следующем: до момента объединения отдельные слова хранятся в языковой рабочей памяти, пока не становится возможным их объединить; на этом этапе несколько «единиц» рабочей памяти сливаются в одну — и «спрос» на мозг моментально уменьшается, поэтому процесс обработки информации читателем на соответствующем языке происходит описанным ранее образом.

В целом каждое добавленное слово или многословная фраза требует от головного мозга приблизительно равной по объему дополнительной активности. Полученные результаты не распространяются на дальнейшие уровни языковой сложности, когда люди могут писать (если не говорить) предложения размером с абзац. Способность мозга «вить гнезда» из фраз наталкивает на мысль об иерархической расшифровке информации. Руководствуясь стандартами некоторых систем образования, от детей требуют составления определенных схем предложений в соответствии с правилами грамматики. Однако кажется, что мозг усваивает эти навыки автоматически.

Почему ты можешь прочитать это?

Станислас Деан

Даже если способность говорить на родном языке является врожденной, нельзя сказать то же самое об умении читать. Образование новых нейронных связей в головном мозге при обучении чтению — отличный пример того, как мозг и нервная система сосуществуют с культурой, приспосабливаясь к ограничениям и требованиям друг друга.

Один из разработчиков эксперимента по расшифровке текстовых данных Станислас Деан и его коллеги из Парижа несколько лет назад связали чтение с небольшой зоной зрительной коры головного мозга,

расположение которой более или менее совпадает на всех снимках головного мозга читающих (невзирая на систему письменности читаемого) и которая проявляет активность в том же полушарии, где локализуются и другие языковые способности.

Рассматриваемая область связана с самым центром сетчатки глаза, *фовеа* — ямке с наибольшей концентрацией клеток и наиболее острым зрительным различением. Как правило, центральная ямка сетчатки реагирует на маленькие и относительно простые очертания или фрагменты определенной формы, которые позволяют нам анализировать сцены и объекты вокруг нас. По мнению Деана, когда мы учимся читать, эта зона адаптируется к распознаванию форм букв алфавита или рассматриваемого набора знаков.

Ученый предполагает, что существуют элементарные формы, которые мозг уже может зарегистрировать даже несмотря на разницу между способами написания символов нашего алфавита и иероглифов китайского языка. Деан пишет: «Любая система письма развивается через анализ различных комбинаций форм, например знаков для слов или звуков. Наш мозг способствовал этому культурному изобретению, поскольку он достаточно пластичен, чтобы перебросить некоторые нейроны на выполнение нового задания. Но он также ограничивает формы, которые может принимать изобретение. В систему письма может быть включен только ограниченный набор форм, которые мы изначально можем воспринять».

Когда мы учимся читать, область зрительной формы слова становится более активной и реорганизует свои связи с областями головного мозга, связанными с устной речью. Согласно Станисласу Деану, «развитие грамотности сопровождается созданием новых путей в языковой сети, принимающих входную зрительную информацию». Наряду с этим область зрительной формы слова в языковом полушарии становится менее восприимчивой к лицам, которые впоследствии распознаются в другом (обычно правом) полушарии.

Микрофон воспроизводит звуковые колебания, но как мозг превращает их в цепочку слов?

Речь

Как и любой другой звук, речь воспринимается слуховым аппаратом в виде непрерывных колебаний молекул воздуха. Впрочем, конкретные звуки распределяются надлежащим образом, указывая на то, что мы слышим слова. Мы воспринимаем слово целиком, а не по частям («каталог» вместо «ка-та-лог»).

Ученым еще предстоит выяснить, как именно это происходит. Новый подход к изучению данного вопроса — сопоставление происходящих в мозге процессов с исследованиями о выделении слов из звуков на основе технической обработки — является наглядным примером прогрессирующего взаимообогащения нейробиологии и информатики.

Становятся более совершенными автоматизированные системы распознавания речи. В этом легко убедиться самостоятельно, обратившись к *Siri* от *Apple*, *Google*-ассистенту или «Алисе» от «Яндекса». Существует несколько способов внедрения таких систем в исследования нейробиологов. В боль-

шинстве случаев эксперименты используют данные, полученные путем *ЭЭГ* или *МЭГ*. Технологии неинвазивны и, в отличие от МРТ, достаточно быстро могут проследить изменения в головном мозге, чтобы подстроиться под частоту звуковых изменений в момент речи. ЭЭГ и МЭГ позволяют получить сведения об одновременном возбуждении группы нейронов. В ходе нескольких исследований напрямую производилась запись с электродов, вживленных в головной мозг пациентов хирургического профиля.

Системы искусственного распознавания речи обучаются на большом объеме данных. Сказанное декодируется статистически при помощи модели вероятностей появления слова, учитывая контекст из уже зарегистрированных слов. Также система использует базы данных по произношению, где слова разбиваются на отдельные единицы речевого потока — *фонемы*.

Подобные системы использовались в систематизации считываемой информации для ее дальнейшего применения на меньшем объеме данных, полученных с электрода во время речевой деятельности. Долгосрочная цель заключается в построении системы, способной генерировать текст из внутренней речи без использования звуков.

Человеческое горло, проанатомированное в XVII веке

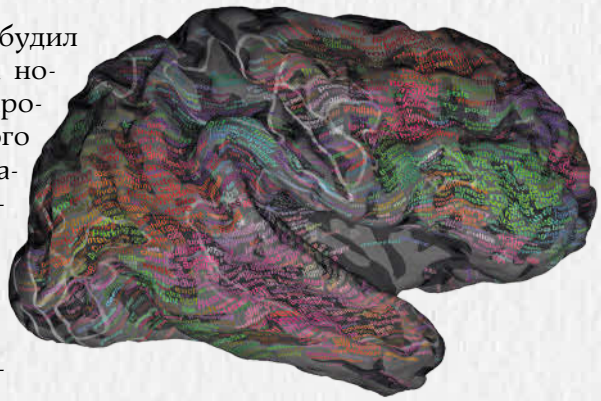
Другие исследователи сравнивали паттерны сигналов, полученных от ЭЭГ и МЭГ во время обработки произнесенных слов, и сигналов, производимых системой искусственного распознавания речи на различных этапах своей работы. Ученые рассмотрели компьютерный анализ данных снимка головного мозга, связанных с конкретным голосовым вводом, одновременно с анализом работы компьютерной системы, запрограммированной на выполнение той же самой задачи.

Смежная работа подобных дисциплин в будущем позволит улучшить системы распознавания речи (например, путем деления непрерывного звукового ввода наиболее естественным образом), а также поможет продвинуться в изучении нейронной обработки речевой деятельности.

Миг озарения

Над головой мультипликационного персонажа в момент возникновения решения будоражащего сознание вопроса загорается лампочка. Согласно результатам одного из недавних исследований, «миг озарения» реален. Точнее, почти реален.

Джек Галант с коллегами из Калифорнийского университета в Беркли в 2016 году опубликовали удивительную карту коры головного мозга человека, на которой изображены области, реагирующие на отдельные слова. Результат (с которым можно оз-



накомиться на просторах интернета) пробудил энтузиазм и вызвал критику. Карта стала новейшим достижением когнитивной нейробиологии, а также примером повторного описания, создающим прекрасные изображения, однако скрывающим реальные механизмы работы мозга.

Описание процесса создания карты позволяет понять, каким образом происходит обработка данных по визуализации мозга для создания такого впечатляющего изображения.

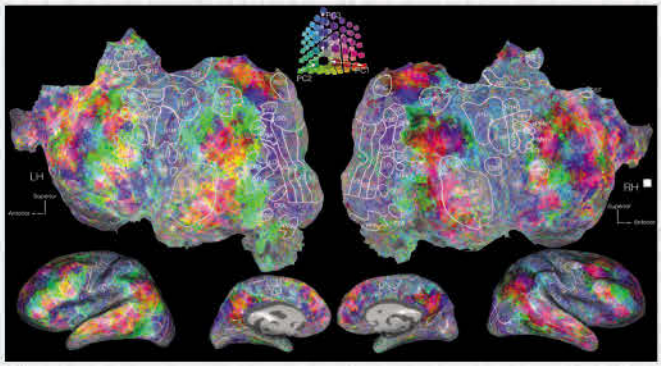
В основе работы лежат предыдущие исследования, нацеленные на картирование *семантического пространства*. В исследовании ученого из лаборатории Джека Галанта Александра Хута участвовали шестеро добровольцев, головной мозг которых сканировали (при помощи аппарата МРТ) во время двухчасового прослушивания аудиоверсии рассказов с более чем 3000 разных слов.

Отдельные слова, вызывающие реакции в небольших клеточных областях, полностью покрывают кору головного мозга

На снимках головного мозга были зафиксированы области повышенной активности (с увеличенным кровотоком) для каждого отдельного слова. В процессе длительного сканирования удалось добиться высокой степени детализации, вплоть до небольших кусочков тканей, известных как *воксели* (от *volumetric* — «объемный» и *pixel* — «пиксель»; единица объемного изображения).

НОВЫЙ ВИД АТЛАСА МОЗГА

Данная совокупность снимков из исследования по языковому картированию демонстрирует распределение реакций на слова, относящиеся к разным категориям, по коре головного мозга. Кора представлена в виде трехмерного изображения, расправленного в центре для более легкого анализа. Все изображения интерактивны.



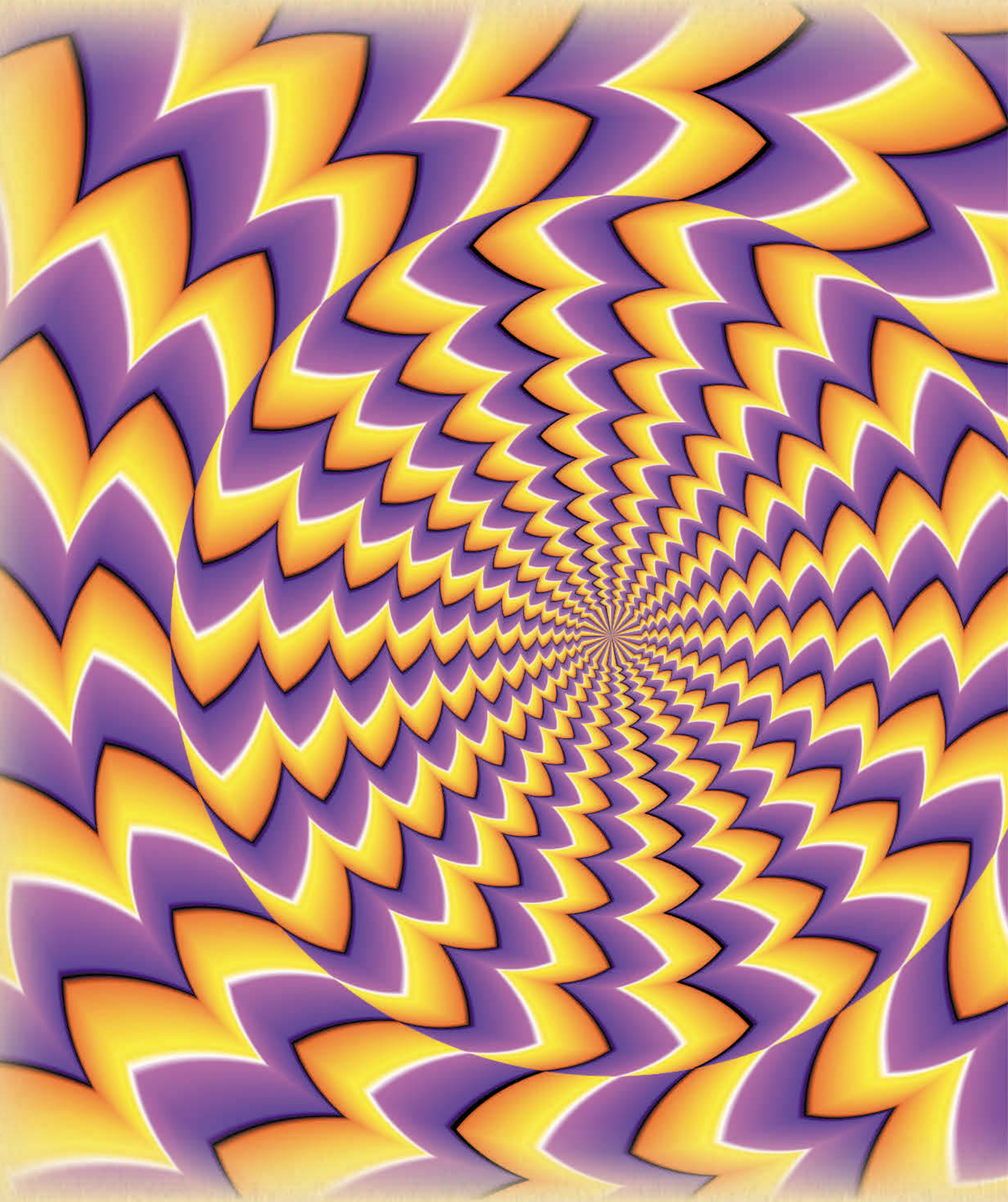
Дальше следовал этап тщательного анализа. Все полученные данные объединяли с базой данных, содержащей огромные корпуса текстов, для определения частоты появления 10 000 слов (3000 исходных + 7000 других) вместе с 1000 общеупотребимых слов. Это и определило то «пространство», в котором подробно представлены все лексические ассоциации. Его роль — предсказать, где именно сканер подсветит любое из 10 000 слов при распознании его испытуемым во время прослушивания текста.

На следующем этапе огромный набор слов сокращается до четырех направлений на основе более широких ассоциаций. Три из них впоследствии использовали для окраски всей карты.

Не может не восхищать попытка привязать слова к областям головного мозга; к тому же она наводит на дальнейшие размышления в этом направлении. Результаты проведенных исследований заставляют иначе взглянуть на научные работы предыдущих лет, затрагивающие вопросы изучения головного мозга и языка. Как показывали предыдущие исследования, обработка языковой информации локализована в конкретных областях головного мозга и, как правило, только в одном полушарии. Но на данной карте видно, что в интерпретации значений слов задействована более или менее вся кора головного мозга, причем на ней нет разделения на полушария. Примечательно и то, что карты, полученные из снимков этой небольшой группы (Хут и еще шесть испытуемых), были в целом схожи. В дальнейшем необходимо исследование более разнородной группы испытуемых и носителей разных языков.

Есть ощущение, что большинство деталей карты, открывающих механизмы языковой системы головного мозга человека, на данный момент находится за пределами нашего понимания. На ней представлены паттерны, связанные со значениями слов. Однако что именно представляют собой сами паттерны? Для ответа на этот вопрос необходима некоторая теоретическая база, которую на данный момент трудно предоставить. Как заметил один исследователь, «маловероятно, что подобные результаты повлияют на изменения концептуализации семантики или нейронной основы обработки языковой информации».

Пусть карта коры головного мозга с привязанными к ней словами и напоминает несколько усовершенствованную форму френологии, она все же является выдающимся техническим достижением, значительно превосходящим возможности предшествующих поколений нейробиологов. Эта карта дает яркое представление о головном мозге, воспламеняющее воображение. Кто знает, к чему это может привести.



Глава 9

МАНИПУЛИРУЯ МОЗГОМ

Центр удовольствия

Связь эмоций, удовольствия и боли с телом неоспорима, но на самом деле их «испытывает» именно мозг. Большинство из нас предпочли бы максимизировать удовольствие и минимизировать боль. Каким бы способом мы ни пытались добиться этого, воздействия на химические и электрические события в нейронных сетях не миновать.

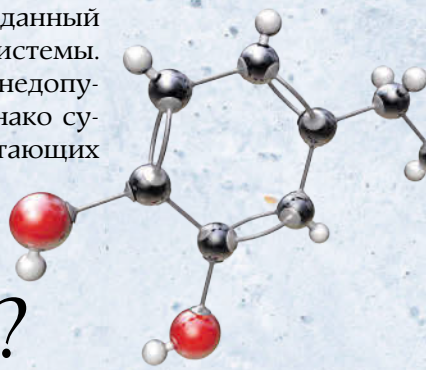
К сожалению, хорошо себя вести и хорошо себя чувствовать — понятия не всегда сопоставимые

В истории задокументировано множество принятых в различных культурах обычаев, вызывающих стимуляцию головного мозга при помощи химических веществ. Сейчас у нас есть дополнительные возможности для прямого воздействия и на движение электрических сигналов. На данный момент мы не можем добиться полного контроля над действиями и получить результаты высокой точности, но мы можем приблизиться к пониманию, как это может произойти.

Основу подобных идей составляет несколько обоснованных наблюдений за тем, как и почему мозг генерирует удовольствие. Как правило, ход любого доказательства уходит корнями в эволюционный контекст. Изначально удовольствие мотивировало людей выполнять те или иные действия и совершать поступки ради выживания и продолжения рода. Текущая версия того, какие части головного мозга говорят на языке удовольствия, принята практически всеми. Информация в этой главе не отображает все содержание данной версии, но, без сомнения, верна.

Порой одна лишь надежда получить удовольствие мотивирует нас действовать

История берет свое начало в 1950-х годах со случайного открытия в ходе эксперимента над грызунами, в головной мозг которых были вживлены электроды. Канадские исследователи обнаружили, что крысы способны бесконечно стимулировать малую область головного мозга при помощи небольших порций электричества, игнорируя при этом все остальное. Возбужденная крыса (центральная фигура исследования головного мозга в 1960-х годах) за час нажала на специальный рычаг до 7000 раз, пока силы окончательно ее не покинули. Дальнейшие исследования позволили выявить группу взаимосвязанных областей, так называемых *центров удовольствия*, роль которых незаменима в регуляции поведения. Грандиозная для своего времени идея превратилась в своего рода общее место в современности. На данный момент мы владеем сведениями о некоторых механизмах системы. Проводить на людях эксперименты по стимуляции оргазма недопустимо (что совершенно не остановило некоторых ученых), однако существуют доказательства, что базовые системы всех млекопитающих работают в целом одинаково.

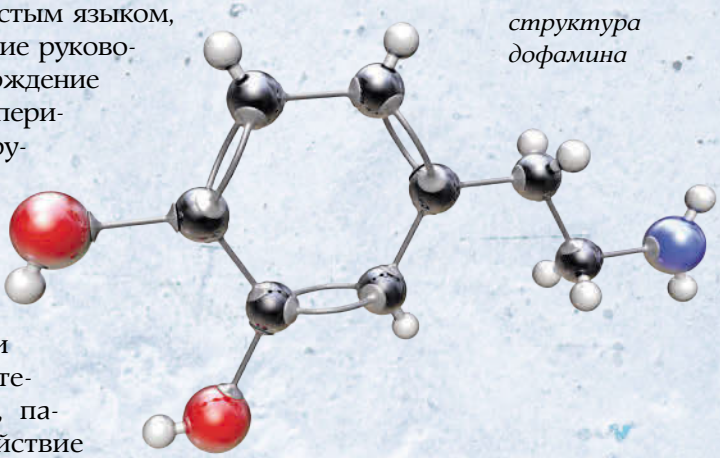


Дофамин заказывали?

Электрические и химические анализы центров удовольствия показывают, что главным действующим лицом является ***вентральная область покрышки (ВОП)*** — небольшая область среднего мозга, аксональные связи которой достигают префронтальной коры, миндалевидного тела, а также гиппокампа и полосатого тела. При возбуждении нейронов ВОП все указанные области получают активирующий нейротрансмиттер — ***дофамин***. Но самые важные соединения для получения удовольствия связывают высвобождение дофамина ВОП с соседней областью полосатого тела, известной как ***прилежащее ядро.***

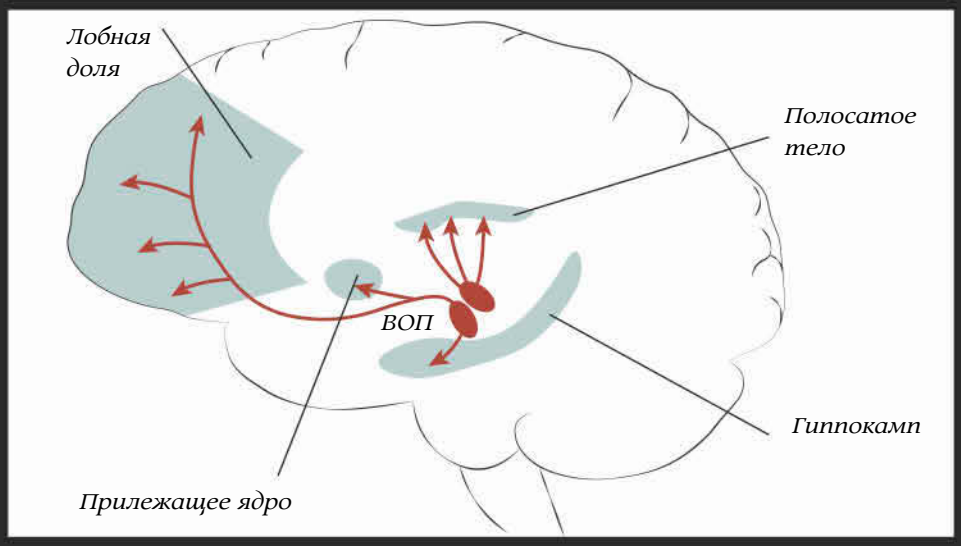
ВОП сравнивает входящие сигналы от возбуждающих синапсов (высвобождающих глутамат), примыкающих к префронтальной коре головного мозга, и тормозящих синапсов (высвобождающих ГАМК) из прилежащего ядра, а затем выбирает, какие из них перенаправлять.

Главная идея заключается в том, что увеличение высвобождения дофамина из ВОП, особенно в прилежащем ядре, приводит к удовольствию. Крыса, которая нажимала на рычаг для получения электрического «вознаграждения», в действительности претендовала на дозу нейротрансмиттера в нужное место. Выражаясь простым языком, наше желание получить удовольствие руководит нашими действиями. В подтверждение этому существует множество экспериментов с применением контролируемой электрической стимуляции, инъекций дофамина или его предшественников, а также химических веществ, блокирующих действие дофамина.



Такая маленькая, но такая важная: химическая структура дофамина

Связи ВОП с другими частями мозга способствовали созданию теорий о связях между эмоциями, памятью и приятным опытом. Действие



Пути дофамина

других нейротрансмиттеров на нейроны ВОП влияет на пластичность системы. Долговременная пластичность синапсов в современных гипотезах о памяти (укрепление одних соединений при ослаблении других) дает детальное представление о взаимосвязи определенного периода времени и превалировании конкретного удовольствия, формировании привычек и о том, как однажды приятные нам привычки превращаются в зависимость. Это далеко не полная картина поведения человека; в действительности она гораздо сложнее, чем у грызунов. Но нейробиология действительно обрисовывает контуры общей теории удовольствия.

Наркотики с историей

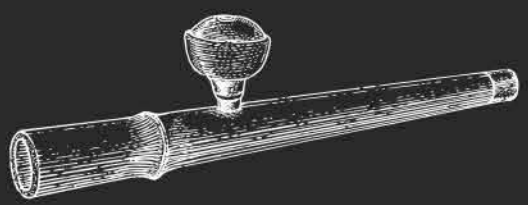
Некоторые наркотики известны искателям удовольствий веками, другие придуманы совсем недавно, но все они в той или иной степени влияют на химическое сообщение между нейронами. В большинстве случаев мы знаем, как они действуют. Каким бы притягательным ни был эффект от них, все они ставят под удар работу такого ценного и хитро организованного механизма, как головной мозг; понимая это, наркотики продолжают принимать миллионы людей. Впрочем, наркотики также способствовали разгадке некоторых тайн работы головного мозга.

Недавние исследования в области нейробиологии представили всем известные наркотики в новом свете. Опиум, который получают из опийного мака, используется вот уже несколько тысячелетий: его основное действующее вещество — *морфин* — впервые выделили в начале XIX века, а еще столетие спустя разгадали его химическую структуру. Героин — простая химическая производная морфина — жирорастворим, что позволяет ему легче проникать сквозь клеточную мембрану. Оба наркотика комплексно воздействуют на организм человека, в том

Иллюстрация художника: китайская опиумная курильня XIX века в Сан-Франциско

числе оказывают обезболивающий эффект, обеспечивают отрешение от житейских забот и вселяют чувство общей эйфории.

Но как? Ответ был найден в 1950-х годах. Небольшие изменения в молекулярной структуре могут привести к появлению наркотиков с более сильным воздействием или к полной блокировке их действия (а это косвенное доказательство существования специфического рецептора морфина). В 1972 году Кэндис Перт наконец удалось обнаружить его при получении высокорадиоактивного блокатора морфина, который достаточно долго примыкал к рецепторам, чтобы выловить их из гомогенизированных клеток мозга. Ее исследование финансировалось в рамках американского проекта президента Никсона по борьбе с наркотиками, который был создан в ответ на появление такой проблемы, как героиновая зависимость среди ветеранов вьетнамской войны. Человечеству ни разу не удалось одержать безоговорочную победу в войне с наркотиками, однако эта война обеспечила небольшую победу нейробиологии. Это вызвало поиск химического ответа на вопрос; почему там был этот рецептор? По всей видимости, в мозге должен быть какой-то ранее неизвестный мессенджер, предназначенный для замка, которому соответствует химический ключ в виде морфина. В 1976 году группе ученых из Шотландии впервые удалось идентифицировать эти внутренние опиаты.

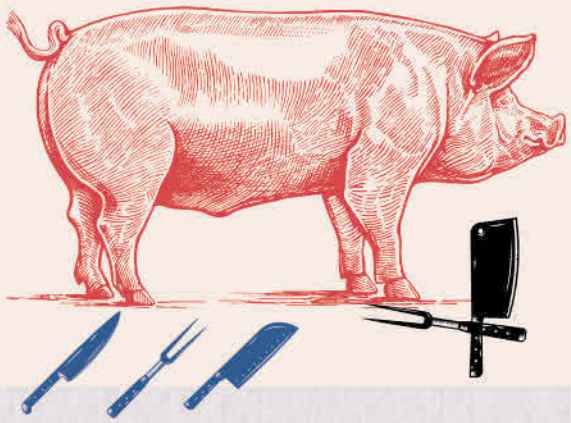


ХИМИЯ НЕРВНЫХ ПРОЦЕССОВ

Сколько свиных мозгов вы желаете сегодня? Что ж, мы могли бы уместить около 20 штук в ящике с сухим льдом на багажнике велосипеда…

Передовые технологии XXI века в области нейробиологии позволяют быстро собирать данные, пусть их и может быть сложно интерпретировать. Большинство же исследований прошлого представляли собой долгий и утомительный процесс, как, например, выделение семейства пептидных молекул, которые воздействуют на морфиновый рецептор.

Все началось на скотобойне в Абердине, где исследователь Джон Хьюз держал целую коллекцию свиных голов для изучения головного мозга. В лаборатории замороженные мозги свиней (другие использовали мозги телят) требовалось размять и тщательно обработать ацетоном, чтобы избавить их от жиров. Получившийся белковый «суп» постепенно уменьшали до смеси небольших молекул, одна из которых могла стать объектом исследования.



Теперь мы знаем, что в большинстве тканей активная молекула быстро разрушается ферментами. Но группа из Абердина использовала препарат для проверки морфиноподобных эффектов в семявыводящих протоках мыши, в которых отсутствуют такие ферменты. К 1974 году они установили в смеси наличие соединений, имитирующих морфин. Потребовалось еще два года на их выделение и изучение структуры, отчасти из-за присутствия в смеси двух молекул, а не одной: пять аминокислот соединялись в один пептид — четыре одинаковых аминокислоты, а последняя может быть представлена двумя различными вариантами. Эта последовательность присутствует в нескольких других гормонах и их предшественниках. Клетки и мозг используют все те же мессенджеры по мере эволюции. Сегодня принято считать, что эндорфины — это вырабатываемые мозгом опиаты, которых открыто уже более 20 видов. Они могли так и остаться незамеченными, если бы не открытие свойств опиумного мака.

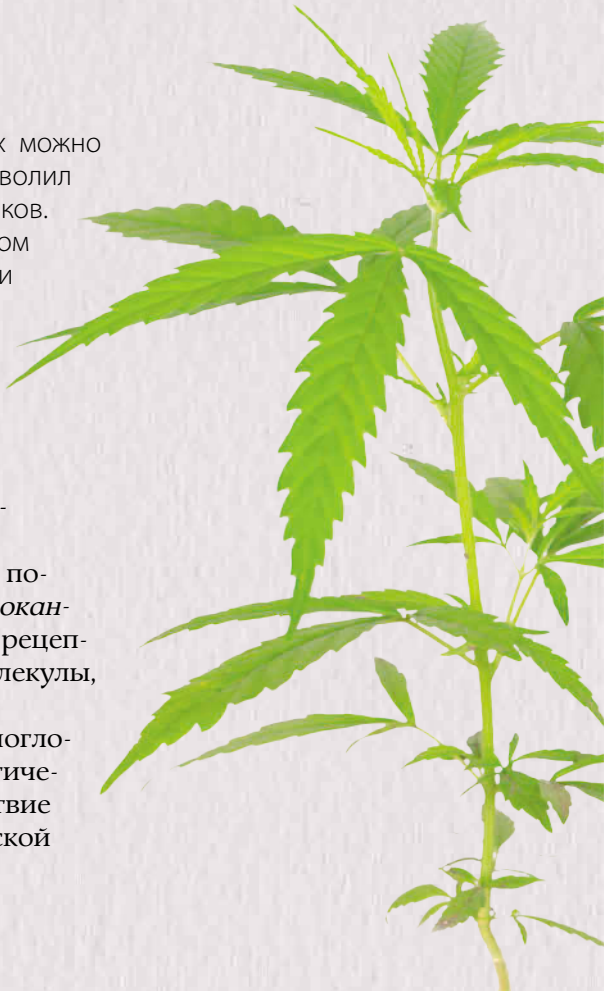
Где происходит действие?

Поиск молекул головного мозга, структуру которых можно сымитировать, и рецепторов, захватывающих их, позволил раскрыть механизмы работы разного рода наркотиков. Если исходить из степени воздействия, то в основном все они связаны с центрами удовольствия. Наркотики так или иначе усиливают действие дофамина в примыкающих к ВОП областях.

Морфин действует опосредованно, сокращая высвобождение ингибиторного нейротрансмиттера ГАМК, что повышает возбуждение нейронов ВОП, которые посылают большее количество дофамина к своим мишеням.

Каннабис оказывает приятное воздействие посредством активного компонента — *тетрагидроканнабинола*, молекула которого прикрепляется к рецепторам, которые обычно распознают в мозге молекулы, образующиеся естественным путем.

Кокаин, напротив, блокирует транспортер, поглощающий дофамин, возвращая его в пресинаптическую клетку. Поэтому отвечающий за удовольствие нейротрансмиттер долго остается в синаптической



щели и оказывает более сильное влияние на свои мишени. Аналогичным образом действует амфетамин.

Никотин идет другим путем к увеличению высвобождения дофамина из ВОП: он прикрепляется к классу рецепторов ацетилхолина, повышающих высвобождение глутамата на принимающую сторону нейронов ВОП, активируя их возбуждение.

Действие алкоголя носит более общий характер, обусловленный его воздействием сразу на несколько рецепторов нейротрансмиттеров. Он также активирует эндорфинную систему, которая, по всей видимости, объясняет присущий ему умеренный эффект эйфории.

От удовольствия к зависимости

Вероятность впасть в зависимость от наркотиков варьируется относительно времени, места, свойств личности и нейробиологических особенностей. Полное представление о зависимости сформировалось на базе результатов научных работ, в которых исследовались связанные с дофамином области головного мозга. Большинство экспериментов проводилось на крысах, которые на этот раз стимулировали себя с помощью химических веществ вместо электрической стимуляции.

Химическая зависимость — это нечто большее, чем просто привычка; она предполагает переход от периодического употребления к сильному пристрастию с непреодолимой тягой и синдромом отмены. В то же время у заядлого наркомана вырабатывается толерантность к применяемому препарату, что проявляется в увеличении дозы и снижении эффекта. И кроме того, существуют сильнейшие ассоциации, которые могут вызвать рецидив у человека, пытающегося избавиться от наркотической зависимости.

О ЛЮБВИ К КОФЕИНУ

Даже кофеин, достигающий большинства эффектов из своего широкого диапазона благодаря способности связываться с аденозиновыми рецепторами мозга, по-своему воздействует на уровень дофамина.

Всеми любимый психостимулятор применяется для повышения умственной и физической работоспособности и устранения сонливости, что достигается благодаря блокировке рецепторов аденозина, присутствующих в большинстве клеток, включая нейроны.

Белки, связывающие малые молекулы, часто образуются на существующих рецепторах, а рецепторы аденозина структурно схожи с другими видами, поэтому некоторые из них формируют устойчивые связи с различными типами рецепторов дофамина.

Когда кофеин попадает в участок связывания аденозином одного из этих белковых комплексов, он меняет форму таким образом, что также влияет на участок связывания дофамина.

Итак, кофеин помимо воздействия на кровяное давление, учащения мочеиспускания, ускорения пульса и повышения концентрации внимания влияет на уровень дофамина, содержащегося в полосатом теле и прилежащем ядре. Вот почему чашечка кофе с утра вызывает хорошее самочувствие и бодрость духа.

Для всего этого требуется время, и не у всех вырабатывается устойчивая зависимость. Наиболее соблазнительным химическим веществом является никотин: зависимыми становятся примерно 80% курильщиков — этот показатель вдвое превосходит число зависимых среди употребляющих героин.

Один из путей понять это — рассмотреть зависимость как что-то, чему мозг способен обучиться. Существуют веские доказательства того, что зависимость изменяет мозг схожим с другими видами обучения и запоминания образом (см. гл. 7).

Прием одной дозы кокаина/морфина/никотина/алкоголя стимулирует долговременное потенцирование некоторых возбуждающих синапсов в ВОП — воздействие, характерное исключительно для наркотиков, вызывающих привыкание, и указанной части головного мозга. Длительное воздействие подразумевает ослабление некоторых ингибиторных синапсов.

Игровые автоматы спроектированы таким образом, чтобы вызывать повторяющийся поведенческий паттерн

Такие изменения могут ускорить высвобождение дофамина путем укрепления связей между ВОП, частями коры и миндалевидным телом, создавая ассоциации, которые способствуют формированию зависимости. Повторное употребление наркотиков провоцирует изменения в областях, ответственных за получение входных сигналов от ВОП, которые, как правило, сокращают высвобождение дофамина при возбуждении нейронов ВОП. Вероятно, в этом и заключается механизм развития толерантности.

Перечисленные выше сведения легли в основу общей теории зависимостей, выходящей за рамки наркотиков и охватывающей также патологическую зависимость от азартных игр, чрезмерного употребления сладкого или секса. Таким образом, поведение, направленное на получение удовольствия, является опосредованной химической манипуляцией мозга. Аналогично этому для преодоления любого вида зависимости необходимо приложить длительные усилия, поскольку под преодолением рассматривается овладение новым поведенческим сценарием.

Я всегда буду любить тебя... Или же до тех пор, пока не закончится действие дофамина

Одурманенный любовью

Если зависимость разрушительна, то может ли одержимость быть благотворной? И каким образом можно разграничить эти понятия? Не составляет труда провести параллель между ранним периодом романтической любви и зависимостью: тяга к близкому контакту, пренебрежение риском, абстинентное состояние от потери любимого человека и даже обострение чувств по прошествии длительного времени после расставания.

Если взглянуть на эти состояния с точки зрения редукционизма, станет понятно, что романтическая любовь активирует пути дофаминовой системы вознаграждения, которые напоминают реакцию на

Хелен Фишер проводит МРТ-сканирование

наркотики, вызывающие привыкание. Полученные результаты исследования при помощи МРТ показали усиление активности в прилежащем ядре — одной из основных мишеней для нейронов в ВОП, причем как у влюбленных с неудачно сложившимися отношениями, так и у счастливых пар.

В это же время Хелен Фишер из Медицинского колледжа им. Альберта Эйнштейна занималась изучением влюбленных и покинутых людей посредством применения фМРТ для сканирования головного мозга. Заголовок одной из самых читаемых ее статей (2005) указывает на подход ученого: «Романтическая любовь: исследование с применением фМРТ по определению нейронного механизма выбора партнера».

По мнению Хелен Фишер, любовь (т. е. фиксация, обусловленная дофамином, «естественная зависимость») возникает неспроста. Романтическая любовь, согласно данному воззрению, не базируется на эмоциях, несмотря на их значимость в формировании опыта. Это часть системы, некий стимул, который мотивирует людей на достижение целей выживания (в данном случае — поиск «идеального кандидата для спаривания»).

Существует мнение противоположного характера: зависимость стоит относить к реалиям любви только в случае плохого исхода, как, например, насилие или поддержание абьюзивных отношений. Однако группа из Оксфордского университета в 2017 году провела критический анализ различных исследований в этой области и пришла к выводу, что любовь — «в некотором смысле» зависимость от другого человека. Главным признаком ее отличия от других видов зависимостей выступает тот факт, что наркотики и гора пончиков никогда не ответят вам взаимностью.

ЧТО ТЫ ВИДИШЬ?

Все ученые солидарны с гипотезой о том, что ЛСД и другие психоделики изменяют состояние сознания. Поскольку сознание остается серьезной проблемой для нейробиологии, сложно сказать, что именно изменяется (подробнее см. гл. 11).

На протяжении многих лет исследования о влиянии ЛСД на организм находились под запретом. Однако результаты некоторых научных исследований на основе сканирования головного мозга все же пролили свет на его эффекты. Полученные сведения указывают на то, что галлюцинации генерируются в тех областях, которые в норме не задействованы в зрительной обработке.

Согласно исследованию, опубликованному в 2017 году группой ученых из Университета Сассекса, некоторые сигналы головного мозга усложняются под влиянием трех наркотических средств — ЛСД, псилоцибин (активный компонент галлюциногенных грибов) и кетамин.

В ходе исследования состояния сознания, измененного под действием веществ, был проведен повторный анализ собранных ранее данных нескольких десятков волонтеров. Последние принимали наркотики, предварительно надев специальные магнитоэнцефалографические датчики. Датчики фиксировали нейронную активность, регистрируя малейшие магнитные изменения, вызванные потоком ионов в дендритах.

В новом анализе применена абстрактная математическая мера разнообразия сигналов, которая считается мерой сложности мозговой активности. Это очень общий показатель, который способен различать паттерны сигналов, полученных от людей в состоянии бодрствования, сна или находящихся под общим наркозом (данный метод использовали для определения уровней сознания; подробнее см. гл. 11).

При воздействии психоделиков наблюдалась мера сложности, отличная от обычного состояния. Что это значит? Исследователь Анил Сет считает, что «электрическая активность головного мозга менее предсказуема и менее "интегрирована" в сравнении с состоянием нормального бодрствования». Вероятно, людям, которые употребляют ЛСД, это известно не понаслышке.

Альберт Хофман

Состояния измененного сознания

Увеличивающие выброс дофамина наркотики манят людей с невероятной силой. Но вещества, способные по-разному изменять восприятие, представляют не меньший научный интерес.

Первый современный галлюциноген — ЛСД — был синтезирован в 1938 году, однако его создатель Альберт Хофман обнаружил его психоактивные свойства совершенно случайно несколькими годами позднее. Теперь нам известно, что структура его молекулы близка по строению с молекулой нейротрансмиттера серотонина, а также с активными компонентами галлюциногенных грибов и мескалина, синтезируемого из американского кактуса пейота. Среди всех традиционных веществ, вызывающих зрительные галлюцинации, ЛСД является наиболее активным: для изменения состояния сознания достаточно всего 25 микрограммов (мкг).

Споры галлюциногенных грибов под электронным микроскопом

Тестирование: Александр Шульгин и психоделики

Химическая структура MDMA широко известна под названием «экстази»

Эксперименты над человеческим мозгом по большей части запрещены, кроме случаев, когда мозг принадлежит вам. Американский биохимик русского происхождения Александр Шульгин увлекался разработкой и тестированием новых психоактивных веществ. В рамках сотрудничества с международной химической компанией ***Dow Chemical*** в 1960-х годах он смог разработать подобный ЛСД амфетамин ***DOM***. После ухода из компании ученый продолжил активно работать над молекулярными структурами новых веществ в лаборатории, которую Шульгин построил на заднем дворе собственного дома. В силу тесной связи с администрацией по контролю за соблюдением законов о наркотиках власти позволяли ему на протяжении многих лет свободно проводить эксперименты на себе, своей жене и друзьях. При создании нового вещества Александр Шульгин оценивал степень его влияния на сознание по специально созданной им шкале (известной как ***шкала Шульгина***), а затем принимал, постепенно увеличивая дозу до момента установления эффектов.

В 1970-х годах ученый приобрел известность в качестве «отца экстази». Он принял 3,4-метилендиокси-*N*-метамфетамин (*MDMA*), первоначально синтезированный как средство, улучшающее свертываемость крови, задокументировал его воздействие на мозг и опубликовал статью о новом веществе. Выйдя в свет, *MDMA* отправился в ночные клубы и стал главным наркотиком рейв-движения по всему миру.

В 1990-х годах его лицензия на работу с запрещенными веществами была аннулирована, но это не помешало ученому продолжить разработку новых соединений. За всю свою карьеру Александр Шульгин создал более 100 видов психоактивных веществ, многие из которых описаны в его книге «Фенилэтиламины, которые я узнал и полюбил» (*Phenethylamines I Have Known And Loved* (1991), известна среди поклонников как *PiHKAL*) и ее сиквеле «Триптамины, которые я узнал и полюбил» (*Tryptamines I Have Known and Loved* (1997), или *TiHKAL*).

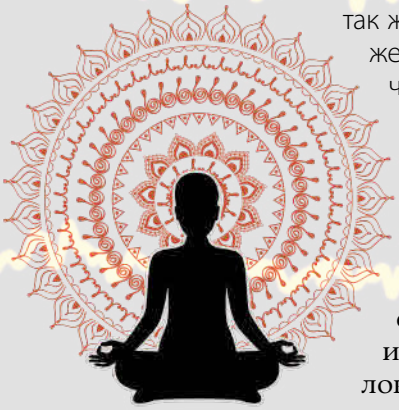
Таблетки MDMA

Он выступал за легализацию тестируемых им соединений, хотя, как он сказал в интервью 2010 года: «Обычно они выжидают примерно четыре года с момента распространения созданного мной препарата, после чего вносят его в список запрещенных психоактивных веществ».

Александр Шульгин был ярым сторонником научной строгости и защитником идей о том, что психоделики расширяют границы сознания. Его шкала уровней интенсивности для оценки новых соединений разработана до уровня +4 — нового, непостижимого состояния сознания. «Если бы любой из когда-

либо созданных наркотиков (или методов/процессов) смог неустанно порождать опыт уровня +4 у всех людей, — писал он, — это служило бы предзнаменованием окончательной эволюции, а возможно, привело бы к завершению человеческого эксперимента».

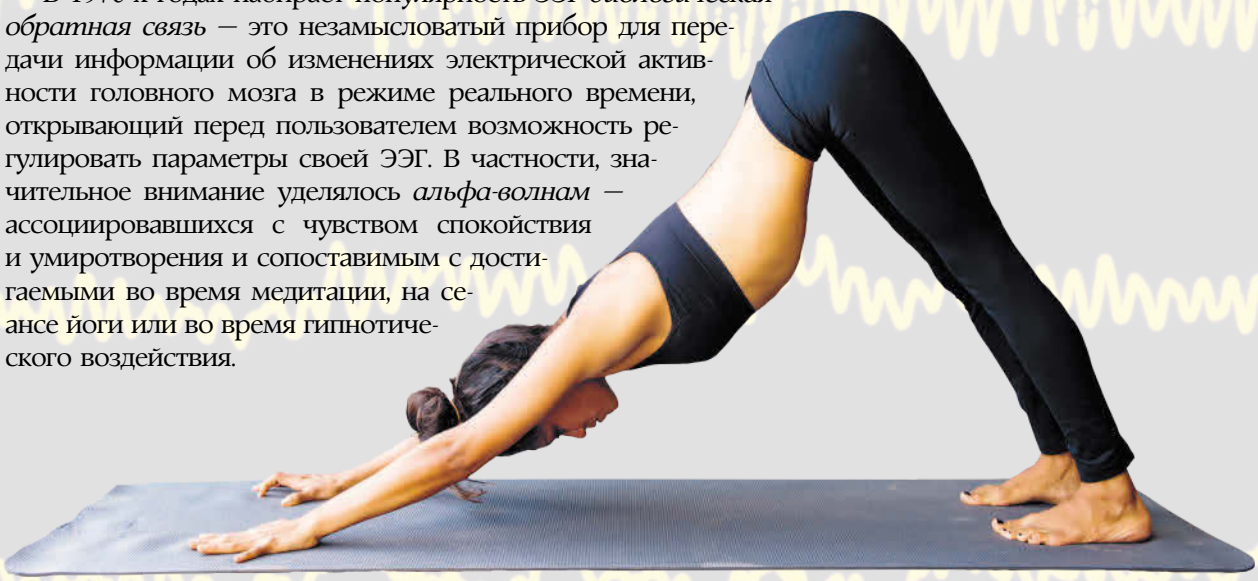
Переменное течение



Употребление наркотиков с целью воздействия на головной мозг, возможно, так же старо, как и весь наш человеческий вид. Очень рано люди также начали заигрывать и с электричеством, но его использование в качестве основной альтернативы для манипулирования мозгом имеет совсем недавнюю историю.

Многие важные открытия основывались на непосредственной стимуляции головного мозга электродами, но только в том случае, если испытуемому была необходима неотложная хирургическая помощь. Наиболее популярные способы изменения электрических сигналов, напротив, неинвазивны. Самые старые и подходящие для рядового человека — световая и звуковая стимуляции. Основоположник метода ЭЭГ Ханс Бергер обнаружил, что сигналы ЭЭГ могут быть изменены при наблюдении испытуемым за движущимися световыми импульсами. Однако подобное световое раздражение может вызвать эпилептические приступы (отсюда и предостережения по поводу стробоскопического эффекта). В 1950-х годах британский нейрофизиолог Грей Уолтер сообщил о возможности появления галлюцинаций при длительном стробоскопическом предъявлении, что может навести на мысль об использовании световых машин в качестве альтернативы психоделическим препаратам или как средства усиления их воздействия. Коммерческий вариант подобных машин, использующих либо свет, либо звук, до сих пор можно приобрести на просторах интернета, однако результаты подобного рода экспериментов научно не обоснованы.

В 1970-х годах набирает популярность *ЭЭГ-биологическая обратная связь* — это незамысловатый прибор для передачи информации об изменениях электрической активности головного мозга в режиме реального времени, открывающий перед пользователем возможность регулировать параметры своей ЭЭГ. В частности, значительное внимание уделялось *альфа-волнам* — ассоциировавшихся с чувством спокойствия и умиротворения и сопоставимым с достигаемыми во время медитации, на сеансе йоги или во время гипнотического воздействия.



Правильно подобранный вид йоги может выступать формой медитации с аналогичным воздействием на мозговые волны

Совсем недавно в некоторых клинических экспериментах фМРТ также выступила в качестве прибора для установления биологической обратной связи, что может помочь облегчить хроническую боль у некоторых пациентов.

Замкнуть мозг

Старинный аппарат ЭСТ, богато украшенный узорами

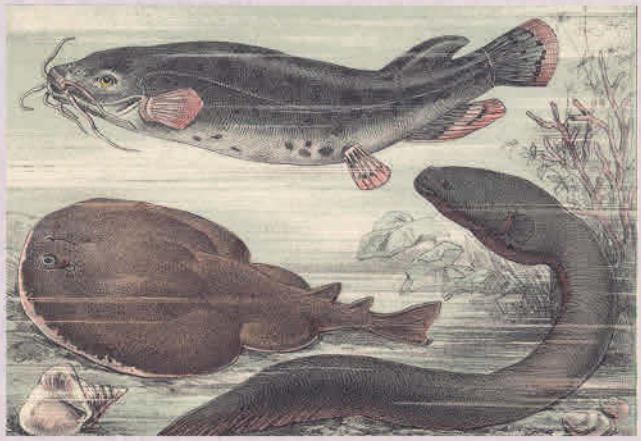
Первые попытки применить электрическую энергию напрямую к головному мозгу были предприняты задолго до появления современных представлений об электричестве и мозге. По некоторым данным, римский целитель лечил головную боль и подагру при помощи «электрической рыбы» (так и не удалось установить, какой именно).

Серьезных попыток использовать электрическое воздействие в качестве метода лечения не предпринималось вплоть до 1938 года: именно тогда итальянский психиатр Уго Черлетти впервые приложил электроды к вискам пациента, страдавшего шизофренией. Предполагалось, что ток вызовет судороги, которые (как и при испытаниях с химическими веществами) смогут облегчить крайне тяжелые симптомы. В некотором роде это был шаг навстречу современным подходам, поскольку ученые допускали, что симптомы возникают в мозге, а значит, воздействие на него может оказаться перспективной альтернативой для психиатрии.

Методика лечения прижилась и к середине 1940-х годов после добавления анестетиков и миорелаксантов получила широкое распространение в качестве средства для избавления от депрессии. Наркотики свидетельствовали о том, что возникновение судорог ограничивалось головным мозгом. По сути, у пациента искусственно вызывали эпилептический припадок.

Электросудорожная терапия (ЭСТ) является одним из самых противоречивых методов лечения в истории психиатрии, что впол-

В наши дни ЭСТ проводят под наркозом

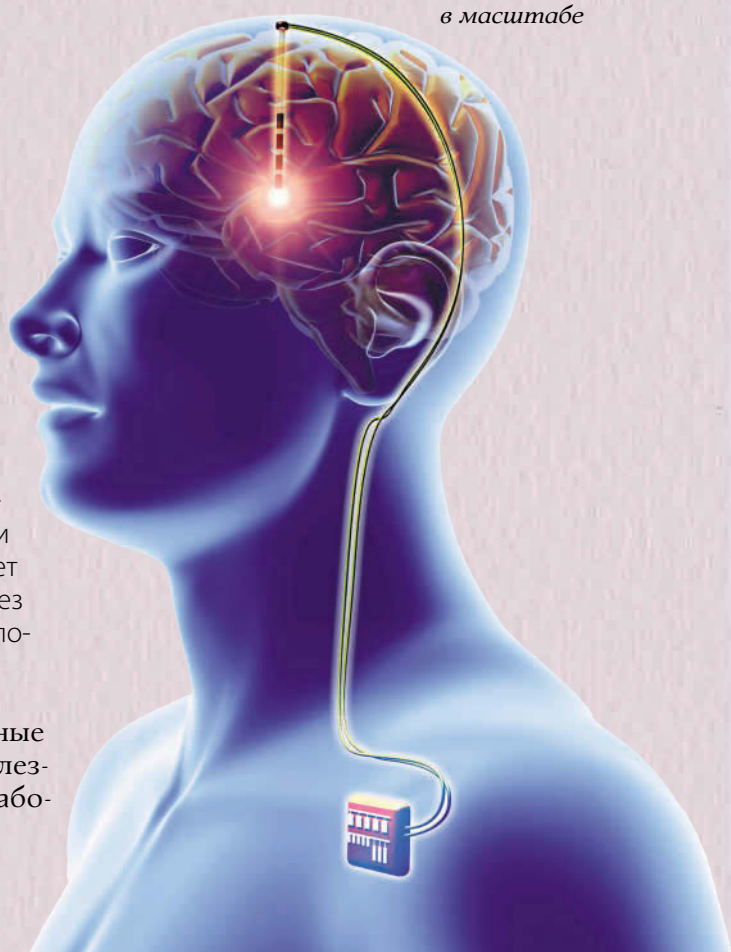


Такие рыбы, как сом, скат и угорь, в случае опасности могут генерировать электрические импульсы

не справедливо. Отчасти дело в том, что механизм воздействия до сих пор не изучен должным образом, и пропускание электрического тока через головной мозг больше похоже на попытку починить радио ударами кулака. В 1950-х годах ЭСТ также служила средством наказания в психиатрических госпиталях. Осторожно подбирая слова, медицинский историк Джонатан Садовски говорит, что знаменитая сцена фильма «Пролетая над гнездом кукушки» (1975), в которой непокорного пациента в исполнении Джека Николсона пытаются усмирить с помощью ЭСТ, «вполне реальна для той эпохи, которую она изображает».

На сегодняшний день электрической терапии каждый год по-прежнему подвергаются около миллиона человек по всему миру. Тщательно мобилизованная современная версия ЭСТ применяется для лечения выраженного расстройства аутистического спектра у детей, а также крайне тяжелых форм депрессии у взрослых, которые сознательно пытаются причинить себе вред. Благодаря анестетикам и миорелаксантам процедура протекает внешне безболезненно, но тем не менее она по-прежнему включает пропускание электрического тока через височные доли, провоцирование судорог и зачастую потерю памяти. Применение ЭСТ считается приемлемым только в случае с теми пациентами, которым не помогают другие методы лечения (однако лучше все-таки установить истинную причину и найти более гуманные способы).

Схематическое изображение подключенных к блоку питания электродов при ГСМ. Электроды изображены не в масштабе



Глубокая стимуляция мозга

ЭЭГ, ОТРАЖАЮЩАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ С ПОВЕРХНОСТИ КОЖИ ГОЛОВЫ, является менее информативным методом исследования, нежели регистрация электрических сигналов от электродов внутри мозга. Аналогичным образом ЭСТ уступает прямому электрическому воздействию через вживленные электроды. Но когда и куда их помещать, а главное, как они могут помочь?

Наиболее впечатляющие и эффективные результаты применения связаны с болезнью Паркинсона — дегенеративным забо-

леванием, для которого характерна утрата контроля над движениями. Такие последствия — результат прогрессирующего разрушения и отмирания продуцирующих дофамин клеток, расположенных в области среднего мозга, называемой *черной субстанцией*.

ГСМ предполагает хирургическое вживление электродов

В наши дни болезнь считается неизлечимой, однако существуют лекарства, позволяющие замедлить ее развитие и облегчить симптомы. Одним из альтернативных методов лечения является *глубокая стимуляция мозга (ГСМ)*. К данному методу прибегают в том случае, если применение предшественников дофамина и соответствующих лекарственных препаратов не оказало должного эффекта или привело к проявлению неконтролируемых побочных эффектов. Определение «глубокий» указывает на проникновение электричества в самые недра головного мозга.

В определенные структуры головного мозга вводят совокупность высокочастотных электродов. Поскольку точный принцип воздействия электричества не установлен, зону для имплантации выбирают на основе индивидуальных симптомов, а кроме того при проведении операции под местной анестезией с пациентом поддерживают беседу.

В отличие от ЭСТ, стимуляция должна быть непрерывной. Электроды соединяются с работающим от аккумулятора нейростимулятором (похож на кардиостимулятор, но здесь пользователь сам может корректировать настройки). Обычно нейростимулятор с проводами, тянущимися до головного мозга, имплантируют подкожно в область грудной клетки через один-два дня. С болезнью Паркинсона таким способом борются вот уже на протяжении 20 лет, и с вживленным нейростимулятором ходит более 100 000 человек.

СВЕТЛОЕ БУДУЩЕЕ

ГСМ обладает важным преимуществом перед лечением лекарствами: она напрямую воздействует на небольшую специфическую область мозга, вместо того чтобы воздействовать на весь орган. Значительный прогресс в лечении болезни Паркинсона способствовал проведению экспериментов по исследованию воздействия ГСМ на некоторые тяжелые психические расстройства. Первыми мишенями стали обсессивно-компульсивное расстройство (ОКР) и депрессия, не поддающиеся лечению другими терапевтическими методами. Результаты пока более перспективны в отношении ОКР, но цифры в обоих случаях невелики. Решение о расположении электродов является камнем преткновения для дальнейшего изучения данных расстройств. Вероятно, верное расположение будет зависеть от получения надежных подтверждений измененной электрической активности для различных расстройств с использованием записи, а также стимуляции на больших группах испытуемых. Пока это возможно только в перспективе.

Транскраниальная стимуляция

В отличие от ГСМ, подразумевающей глубокое проникновение через естественные барьеры, новые методы воздействия на кору головного мозга являются неинвазивными. Один из методов — электрический, другой — магнитный. Названия их схожи — ***транскраниальная микрополяризация*** и ***транскраниальная магнитная стимуляция*** за счет дистанционной генерации определенных сигналов.

Микрополяризация

Магнитная стимуляция (внизу)

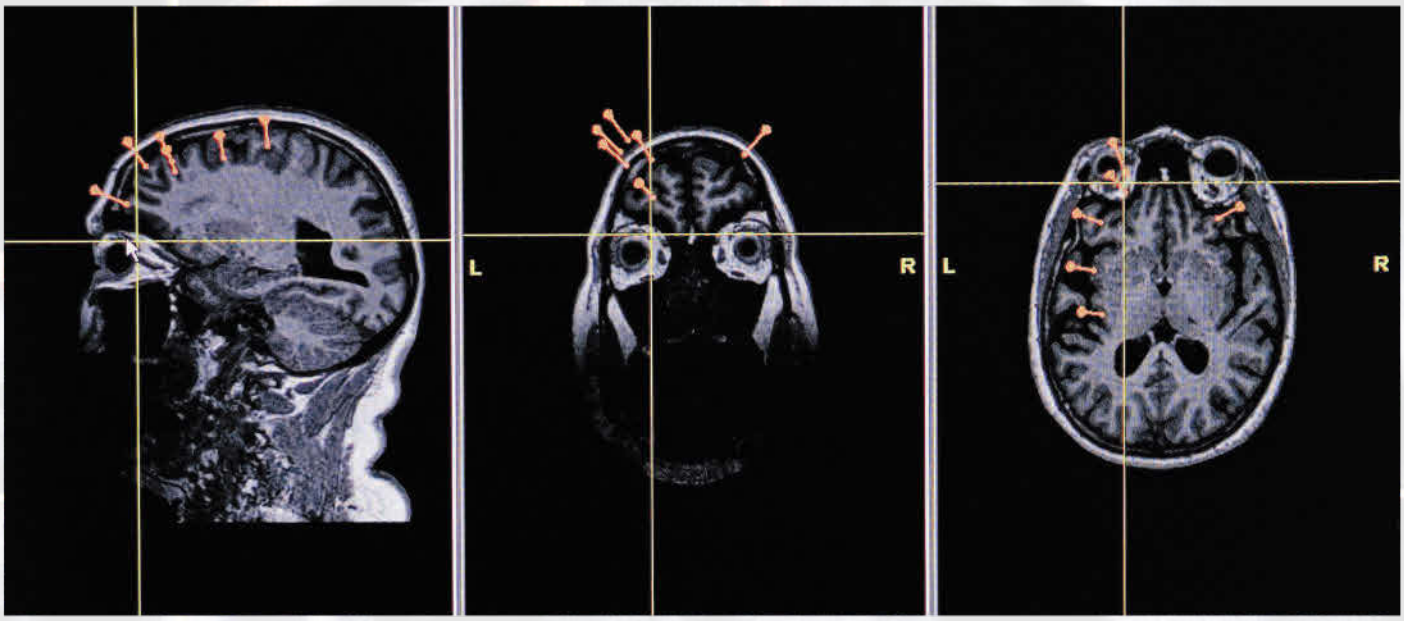
МИКРОПОЛЯРИЗАЦИЯ

Данный метод лечения с помощью электрического воздействия немного напоминает ЭСТ. Принцип его действия заключается в активации электродов, пропускающих малый постоянный ток, измеряемый в миллиамперах (мА). Силы тока вполне достаточно, чтобы почувствовать его при стимуляции, однако он недостаточно эффективен для возбуждения нейронов напрямую. Согласно одной теории, микроток действует на вероятность возбудимости путем изменения мембранного потенциала.

За счет своей простоты и относительной безопасности микрополяризация применялась для лечения различных заболеваний — от депрессии и шизофрении до хронической боли, — а также в попытках улучшить обучаемость, показатели памяти и даже повысить уровень интеллекта. Рандомизированные испытания едва начались, а результаты уже опубликованных исследований отмечают незначительную пользу. При желании вы можете сами провести стимуляцию коры с помощью специального оборудования, которое можно купить в интернете, однако мы бы не рекомендовали делать это.

МАГНИТНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ

При магнитной стимуляции используется электромагнитная катушка, подающая короткие магнитные импульсы. Импульсы порождают электрическое поле внутри головного мозга, которое индуцирует в близко расположенных тканях пациента ток, воздействующий на нейроны. В силу бы-



МРТ-сканирование помогает установить оптимальное место для магнитной стимуляции, способной облегчить симптомы депрессии

строго уменьшения поля глубина проникновения магнитного поля составляет примерно 2 см. По простоте локализации микрополяризация выигрывает у магнитной стимуляции. Однократная транскраниальная магнитная стимуляция используется в целях диагностики, например при оценке тяжести повреждений после инсульта, а также применяется для экспериментального лечения, однако интерес сфокусирован на выявлении терапевтической эффективности. При тяжелой депрессии и хронической боли прибегали к повторному применению метода магнитной стимуляции. Для страдающих от частых мигреней были разработаны и запущены в активное промышленное производство коммерческие наборы, одноимпульсная магнитная стимуляция которых позволяет облегчить приступы.

Поскольку все это связано с состоянием, причина которого неизвестна, и с лечением, которое не до конца понятно, на данный момент лучше рассматривать магнитную стимуляцию как исследовательский метод. Современное состояние науки в области манипулирования мозгом таково, что вопрос «Могу ли я сперва увидеть, как вы сделаете это сами?» — это хорошее правило, которое следует соблюдать, когда предлагается новый метод.

Глава 10

МОЗГ В ДЕПРЕССИИ

«Придумай,
Как удалить из памяти следы
Гнездящейся печали, чтоб в сознанье
Стереть воспоминаний письмена
И средствами, дающими забвенье,
Освободить истерзанную грудь
От засоряющих ее придатков»

Сложность установления диагноза

Эти слова принадлежат Макбету, герою одноименной трагедии Уильяма Шекспира (пер. Б. Л. Пастернака), и они актуальны и по сей день. Даже если мы признаем, что расстройства в работе мозга являются причиной человеческих страданий, полная картина остается непостижимой. Исследования обнажили многие подробности функционирования головного мозга, но клинический подход к психическому здоровью только начинает знакомиться с благами современной нейробиологии, которые дают надежду на светлое будущее.

Исследование головного мозга на уровне клеток и синапсов способствовало пониманию многих процессов, но их до сих пор сложно связать с такими высокоуровневыми явлениями, как настроение, искаженное восприятие, поведение и состояния сознания. Именно этого мы и пытаемся достичь при изучении психических заболеваний, однако все еще в значительной степени полагаемся на лучшие догадки вдумчивых врачей, а не на что-то более научное.

Нейробиология помогла установить, как химическое лечение некоторых расстройств влияет на нейроны, главным образом на нейротрансмиттеры. Это привело к оправданию применения тех лекарственных препаратов, свойства которых, как правило, открывались случайно, и улучшению качества других. Однако это все еще не объясняет, почему они помогают.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМЫ

Описанная нами неоднозначность отчетливо прослеживается при постановке диагноза. «Диагностическое и статистическое руководство по психическим расстройствам» Американской психиатрической ас-

Методы лечения психических расстройств несоизмеримо улучшились с тех пор, как Уильям Хогарт изобразил на картине клинику «Бедлам» в Лондоне XVIII века, но их диагностика по-прежнему вызывает затруднения

социации в текущей пятой редакции содержит тысячу страниц и описывает больше 150 различных состояний (впечатляющий перечень симптомов, не так ли?). Диагноз ставится главным образом на основе соответствия стандартизированным спискам, а не непосредственно происходящих в мозге процессах. Большинство состояний можно определить исходя из поведения или самочувствия пациента, но это не единственные определяющие факторы. Кроме того, для каждого приведенного симптома есть люди, у которых его нет, но диагноз ставится; а есть люди, у которых симптом в наличии, но диагноз не ставится. На протяжении всего времени существования психиатрии как науки психические заболевания или недееспособность выступали предметом незатухающих споров. Недавние дискуссии относительно некоторых синдромов указывают на то, что споры зачастую зависят от того, что именно понимается под нормальным функционированием и как справляться с отклонением от нормы.

От случайного открытия к серотонину

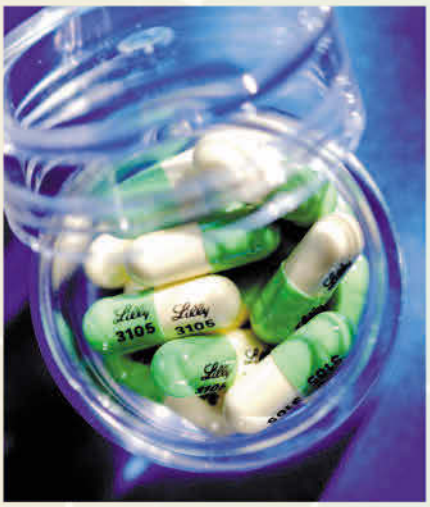
В 1952 ГОДУ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИСПЫТАНИЕ ИПРОНИАЗИДА НА ПАЦИЕНТАХ С ТУБЕРКУЛЕЗОМ в США приняло неожиданный поворот: используемое антигистаминное лекарственное средство не повлияло на протекание болезни, однако глубоко подавленные до этого пациенты обрели беззаботное чувство воодушевления.

В 1980-х годах флуоксетин, способствующий повышению уровня серотонина, впервые стали применять в качестве антидепрессанта

Более поздняя работа показала, что препарат ингибировал фермент *моноаминоксидаза*, который расщепляет несколько простых молекул, действующих как нейротрансмиттеры, включая дофамин и серотонин. К концу десятилетия его начали продавать в качестве антидепрессанта. На протяжении 1960–1970-х годов в широкое употребление вошли *ингибиторы моноаминоксидазы (ИМАО)* — усовершенствованные препараты того же класса. По словам британского психиатра Дэвида Хили, их появление ознаменовало наступление эры антидепрессантов.

Это было значимым событием, и тому есть несколько причин. Лекарственный препарат, действующий на уровне нейротрансмиттеров (в данном случае увеличивая их доступность), казалось, предлагал научный метод лечения мозга. Химическая терапия помогла убедить докторов и пациентов в очевидном для нас сейчас положении о биологической обусловленности психических расстройств, а также дала направление множеству исследований причин и последствий психических заболеваний и методов их лечения.

Лечение, как правило, опережает науку, в том числе не без помощи внушительной рекламы со стороны фармацевтических компаний. Серьезные психические заболевания



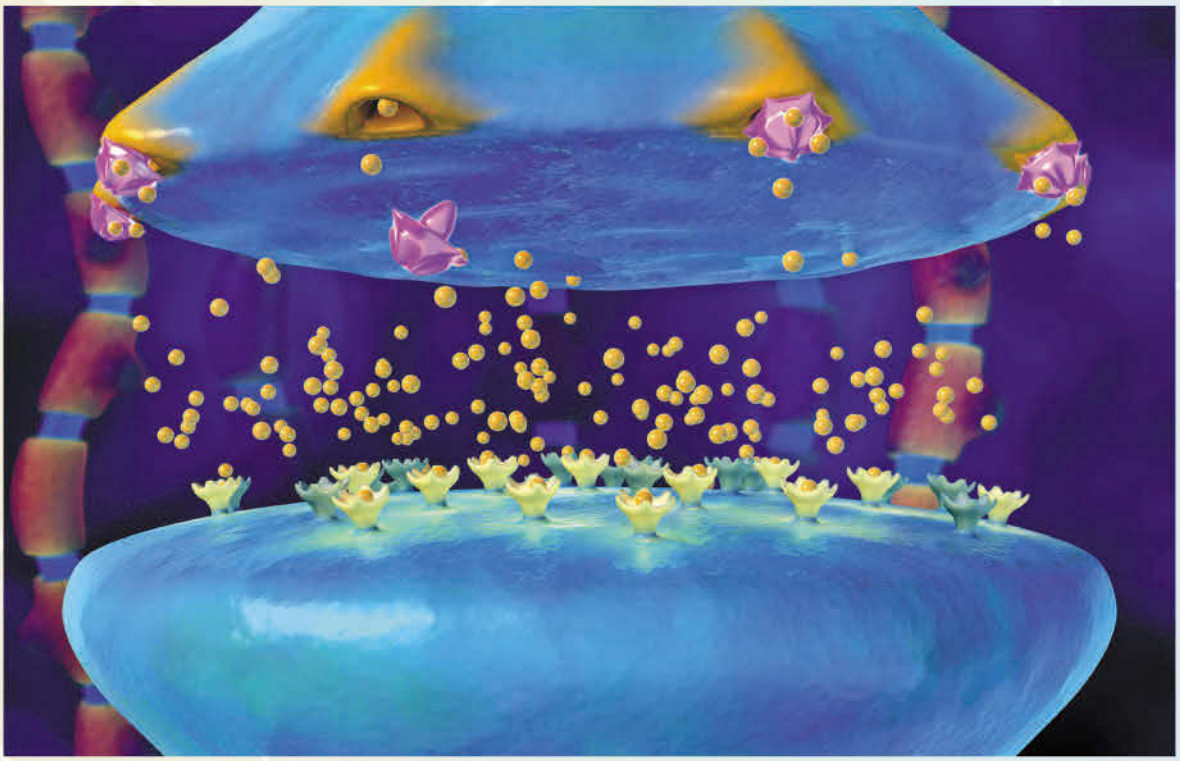
Лекарственные препараты для основных психических заболеваний являются основой современной фармацевтической промышленности

подрывают здоровье, влияют на качество жизни, порой даже ставя ее под угрозу; отсюда и возникает необходимость в безотлагательном лечении. В таких случаях невозможно ждать научного обоснования происходящего. Поэтому попытки докторов помочь пациентам развиваются то в одном, то в другом направлении, как и научные исследования. Историю психофармакологии можно описать как вереницу случайных открытий и вполне правдоподобных идей о воздействии психофармакологических средств, что привело к положительной динамике, хотя впоследствии и оказалось, что идеи имели ограниченное применение или вовсе неверны.

Озабоченность чистотой часто выступает одним из симптомов обсессивно-компульсивного расстройства

Серотонин — важная фигура в этой истории, но его значимость менялась по мере развития различных направлений исследований. Последующее поколение антидепрессантов — селективные *ингибиторы обратного захвата серотонина (СИОЗС)* — увеличивает возможности этого конкретного нейротрансмиттера, блокируя транспортеры, которые удаляют его из синаптической щели. Это позволяет избежать сочетания эффектов (в том числе побочных) от действия ИМАО на уровнях нескольких различных нейротрансмиттеров. Первые СИОЗС, такие как *прозак,* были представлены в 1987 году. Они оказались особенно эффективны в отношении тяжелобольных пациентов. Выяснилось, что серотонин — своего рода ключ к удовольствию, поэтому некоторые принимали прозак с целью почувствовать себя «лучше некуда».

Требовалось приложить немало усилий, чтобы доказать данное предположение, а все попытки установить роль серотонина потерпели

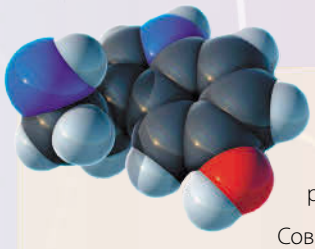


Художественное представление ингибирующего препарата, блокирующего обратный захват серотонина после его высвобождения из синапса (сверху)

неудачу в силу огромного количества противоречивых результатов. Прежде всего, СИОЗС воздействуют только на один нейротрансмиттер. Но эта одна молекула обладает многими эффектами, производимыми по меньшей мере семью различными семействами рецепторов и многими подтипами рецепторов.

Также возникает необходимость объяснить, почему облегчение симптомов при депрессии обычно не происходит в течение нескольких недель, в то время как нейротрансмиттеры и их транспортеры участвуют в крайне быстрой смене событий на молекулярном уровне.

То же самое происходит, когда СИОЗС используются для лечения тревожных расстройств. Известна эффективность бензодиазепинов при лечении состояний, включающих панические атаки, фобии, а также посттравматическое стрессовое и обсессивно-компульсивное расстройство. Оказалось, что СИОЗС действительно могли помочь некоторым людям с этими расстройствами, но прием этих препаратов сопровождался таким же запаздыванием наступления эффекта, что и при лечении депрессии. Бензодиазепины усиливают воздействие ГАМК, тормозящего нейротрансмиттера, поэтому быстрый эффект затухания можно объяснить. В случае СИОЗС понять их воздействие гораздо сложнее.



Серотонин — один из основных нейротрансмиттеров, стимулирующий множество разнообразных рецепторов в головном мозге

ТРЕВОГА В ГЕНАХ

Дальнейшие работы по изучению взаимосвязи между тревожными расстройствами и серотонином иллюстрируют сложности, связанные с множественной причинностью и тонкими изменениями в эффектах, которые обнаруживаются исследователями при более детальном изучении конкретных заболеваний.

Современные ученые определяют тревогу как реакцию головного мозга на стресс, включающую целый каскад гормонов. Одним из таких гормонов является кортиколиберин, синтезируемый специализированными нейронами гипоталамуса. Кортиколиберин вызывает усиление секреции гипофизом адренокортикотропного гормона, что, в свою очередь, стимулирует надпочечники выделять гормон стероидной природы — кортизол, участвующий в развитии физиологических реакций на стресс и реакцию на угрозу. Первоначальная нейронная гормональная секреция регулируется мозговыми цепями, которые были обнаружены в миндалевидном теле и гиппокампе — последний и сам реагирует на кортизол в одной из нескольких петель обратной связи.

Как же серотонин вписывается в столь проработанную систему? Эта часть не совсем ясна. Тот факт, что тревожные расстройства часто встречаются у членов одной семьи, хорошо согласуется с исследованиями мутаций в генах транспортеров серотонина. В начале 1990-х годов у пациентов из двух разных семей с высокой частотой проявления ОКР обнаружили мутацию пары генов, повышающих активность транспортера. Если вы помните, он участвует в обратном захвате нейротрансмиттера после его высвобождения в синапсе, а это указывает на пониженную активность столь важного химического мессенджера у этих людей.

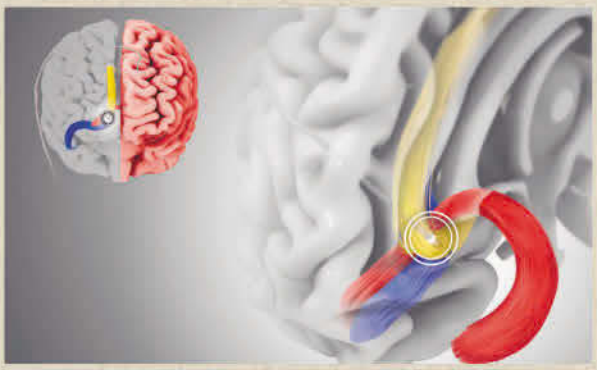
На данный момент это одна из самых прочных обнаруженных связей между относительно простыми генетическими изменениями и поведением, однако она затрагивает лишь некоторых людей. Теперь мы знаем, что такого рода изменения не просто передаются от родителя к ребенку: помимо наследственных мутаций в последовательности ДНК есть и другие изменения, известные как эпигенетические, например возникающие в результате модификации одной из химических единиц в цепи ДНК путем присоединения метильной группы. Подобные изменения влияют на возможности фермента закрепляться на цепи ДНК и таким образом способствуют регуляции активности генов.

В 2014 году группа исследователей из Университета Дьюка зафиксировала небольшие изменения в метилировании гена транспортера серотонина в слюне, собранной у 80 студентов учебного заведения. Сканирование головного мозга этих же студентов во время просмотра снимков лиц, выражавших эмоции страха или гнева, показало, что повышенное метилирование сопровождалось «увеличением активности миндалевидного тела, связанной с восприятием угрозы».

В этом случае слегка измененный ген ослабил активность транспортера — что вызывает дополнительные вопросы. Выявление таких эпигенетических изменений, представляющих своего рода реакцию генов на воздействие окружающей среды в жизни конкретного человека, подчеркивает, как много переменных могут повлиять на организацию головного мозга.

Тревожные расстройства могут передаваться по наследству: это придает вес теориям, согласно которым расстройство появляется при мутации в генах, участвующих в транспорте нейротрансмиттеров.

Прямое воздействие на депрессию?



Направленное воздействие стимуляции на четыре специфических нервных тракта в головном мозге может помочь некоторым пациентам избавиться от депрессии

Лекарства и психотерапия могут помочь людям с депрессивным расстройством без полного понимания того, как они работают. Также не стоит упускать из виду метод электрошоковой терапии, который по-прежнему считается эффективным средством лечения крайне тяжелых форм (подробнее см. гл. 8). Может ли нейробиология содействовать более прямому воздействию на депрессию?

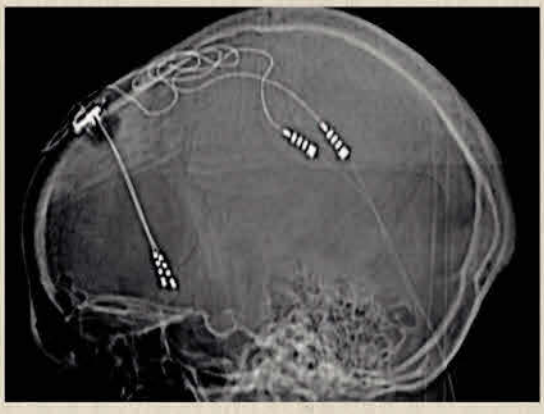
С 1990-х годов в ходе визуализирующих исследований ученые пытались выявить отличительные признаки в активности головного мозга у испытуемых с депрессией. Как и в случае с результатами сканирования в целом, во многих исследованиях были представлены маленькие выборки, что сказывалось на достоверности и сложности подтверждения результатов. Самый крупный на сегодняшний день метаанализ в области депрессии — предполагающий объединение данных множества исследований для получения более объективных данных — не выявил различий между результатами сканирования в среднем у испытуемых с депрессией и кем-либо еще.

Тем не менее депрессия, подробно другим психическим расстройствам, отмечает серию явно выраженных путей, по которым может следовать мозг. Эти пути имеют разного рода отправные и финальные точки. Некоторые исследователи, основываясь на результатах анализа, пришли к выводу, что существуют различные группы паттернов активности, согласующихся с разными группами симптомов.

В начале 2000-х годов невролог Университета Эмори в США Хелен Майберг предположила, что позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) и фМРТ укажут на область в коре головного мозга — *субкаллозальную область поясной извилины*, также известную как *поле Бродмана № 25* и принимающую активное участие в «нейронной сети» депрессии. В случае эффективного лечения эта нейронная сеть претерпевает изменения, а при сохранении симптомов у пациента остается неизменной.

Врачи направили свои силы на лечение этой области у людей с тяжелыми формами депрессии, не поддающимися другим существующим терапевтическим методам. Этой же логикой руководствовались и при применении электросудорожной терапии, однако потребовалось нечто более точное, поэтому было принято решение начать с ГСМ с использованием имплантированных электродов в эту область.

По предварительным данным, состояние пациентов с тяжелой депрессией улучшилось. Но



в 2013 году первое клиническое испытание имплантата от депрессии было прекращено ввиду противоречивости мотивированного обоснования.

Недостаточная концентрация

На рентгеновском снимке видны вживленные для проведения ГСМ электроды

Наши чувства эволюционировали, чтобы позволить нам фиксировать различия. Наше внимание резко обостряется при появлении нового для нас стимула, что позволяет подготовиться к бою или, что не менее вероятно, к бегству. Но мы также должны на протяжении долгого периода времени уметь концентрироваться на выполнении сложных задач, определяющих нас как человека. Многие люди, стремящиеся к выработке усидчивости, например для написания книги, пытаются найти баланс между внимательностью и рассеянностью. Однако систематические трудности с концентрацией внимания могут свидетельствовать о наличии неврологического расстройства.

Вероятно, самое противоречивое состояние в психиатрической практике — это синдром *дефицита внимания и гиперактивности (СДВГ);* его широко диагностируют, в то же время существует мнение, что несмотря на включение расстройства во все официальные классификации в действительности его не существует.

За последние несколько десятилетий диагноз СДВГ все больше ставят детям школьного возраста, особенно в США, где частота возникновения расстройства в некоторых регионах достигает почти 10%. Наряду с немедикаментозной терапией в качестве лечения использовали стимулирующие препараты — *метилфенидат (риталин)* или *амфетамин*. Одни рассматривают это как признак тревожащей нетерпимости к поведенческим расстройствам, другие — как благоприятный признак того, что потребности детей, привыкших самостоятельно справляться с ожиданиями и требованиями социума, теперь воспринимаются всерьез.

Неоднозначная реакция по отношению к расстройству связана отчасти с тем, что СДВГ, как и другие психические расстройства, диагностируется по перечню поведенческих черт, нежели по каким-либо более объективным тестам. Поведенческие характеристики различаются количественно, а не качественно, а диагноз представляет собой суждение. Легко заметить, что люди с острыми проблемами нехватки внимания нуждаются в помощи. Но насколько успешным может оказаться лечение и каковы последствия продолжительного употребления указанных лекарственных препаратов?

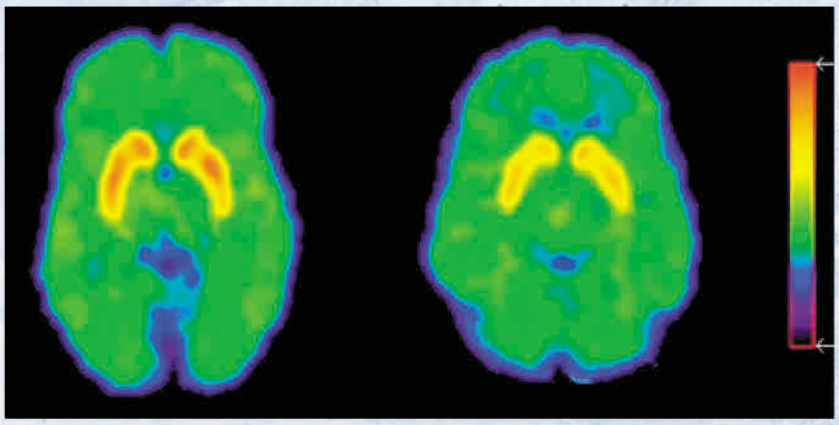
Повышенная отвлекаемость детей является их милой особенностью. Так когда же она становится проблемой?

Роль нейробиологии, как правило, заключается в установлении причин появления определенного состояния, составлении метода лечения (при необходимости) и изучении механизма его работы.

Большинство наиболее подходящих исследований сосредоточилось на дофамине. Нам известно, что эффективность применения лекарственных препаратов достигается через воздействие на передачу нервных импульсов, повышающих уровень дофамина в синапсах. Трудность заключается в определении уровня дофамина или активности транспортера дофамина у пациентов с СДВГ. Предположение о том, что в ключевых областях головного мозга может быть мало рецепторов дофамина, также сложно подтвердить.

Последние научные исследования направлены на изучение областей префронтальной коры головного мозга, в которых у людей с СДВГ содержится меньше серого вещества, чем у людей, не подверженных данному расстройству. Есть также свидетельства того, что при выполнении сложных заданий метилфенидат повышает у испытуемых со слабой концентрацией внимания обычно сниженный уровень дофамина в области, находящейся в глубине полушарий головного мозга и известной как *хвостатое ядро*. Однако такой результат показали как пациенты с СДВГ, так и люди из контрольной группы, что затрудняет аргументацию в пользу существования простой связи между нехваткой дофамина и развитием СДВГ.

Снимок из исследования с применением ПЭТ для изучения уровня дофамина при СДВГ



Контрольный испытуемый *Испытуемый с СДВГ*

Альтернативным методом лечения СДВГ является индивидуальная психотерапия со взрослым человеком

Как и для любого другого психического состояния, существует множество других данных, полученных в результате сканирования головного мозга, исследований воздействия других нейротрансмиттеров на конкретные области головного мозга и изучения генных мутаций, которые увеличивают вероятность развития тяжелой формы СДВГ. Вероятно, по мере развития всех этих направлений исследования СДВГ станет еще одной разновидностью расстройства, при которой совокупность причин в различных комбинациях вызывает отклонения в развитии головного мозга. Тем временем другие исследователи сравнивают эффективность лечения лекарственными средствами и прочих методов оказания помощи детям и взрослым с СДВГ, оценивают влияние продолжительного приема лекарственных препаратов на организм, а также исследуют то, как дети, которых лечили от СДВГ, проявляют себя во взрослом возрасте.

Отличие, дефект, разнообразие

В КАКОЙ МОМЕНТ ОТЛИЧИЕ ОТ БОЛЬШИНСТВА СТАНОВИТСЯ ПРИЗНАКОМ РАССТРОЙСТВА?
Если нарушения затрагивают головной мозг, людям с отличиями есть что рассказать.

Социальная жизнь человека невероятно сложна, и каждый справляется с ней по-своему

Новейшая история аутизма демонстрирует, что обсуждаемый вопрос может одновременно затрагивать социальные и политические сферы жизни, а также служить ориентиром для биомедицинского исследования. На протяжении долгого периода времени аутизм рассматривали в качестве серьезного расстройства развития и поведения, характеризующегося нарушениями социального взаимодействия и общения. Это отклонение является в значительной степени наследственным, однако генетика заболевания сложнее, чем может показаться на первый взгляд. Вполне вероятно, что, как и в случае с СДВГ, огромное количество возможных причин играют существенную роль и могут привести к одинаковым на первый взгляд результатам. Нейробиология сосредоточила свои силы на установлении взаимосвязи между характерными признаками расстройства аутистического спектра и особенностями развития и активности головного мозга. Среди таких особенностей можно назвать различия на снимках головного мозга при рассмотрении человеческих лиц или прослушивании устной речи испытуемыми. Некоторые продолжают таить надежду на

Тест, который может помочь диагностировать аутизм

выздоровление от расстройства, которое в худшем случае может привести к инвалидности.

Тем не менее сейчас мы знаем, что столь тяжелые состояния лежат на одном конце широкого спектра и, как изложил Стив Сильберман в своей книге «Нейрокланы», аутизм и синдром Аспергера, некогда самостоятельные виды расстройств, на сегодняшний день входят в состав расстройств аутистического спектра (РАС).

Спектр включает и состояния людей с менее выраженными симптомами и признаками, в том числе с высокофункциональным аутизмом, при котором есть возможность развить навыки социального взаимодействия. Наряду с осознанием распространенности некоторых поведенческих особенностей, связанных с аутизмом, это породило концепцию нейроразнообразия. Активисты данной концепции выступают против стигматизации аутизма, утверждая, что аутизм является примером такого разнообразия.

Концепция предполагает, что головной мозг человека обладает общим планом строения, но его развитие может идти по разным траекториям. Человек может соответствовать статистической норме (быть нейротипичным), а может обладать некоторыми отличительными нейронными образованиями, которые не обязательно рассматривать как проблему. Людям с признаками расстройства аутистического спектра требуется особое отношение, позволяющее им справляться с сенсорными и социальными перегрузками. Некоторые из них развивают у себя особые таланты. Так, ученый с аутизмом Тэмпл Грандин специализируется на поведении домашних животных, а свой талант объясняет высокой способностью к визуальному мышлению.

Подобные примеры говорят нам, что отличие не обязательно означает дефект. В современном мире концепция нейроразнообразия и принятия СДВГ, дислексии, синдрома Туретта и даже шизофрении как естественной вариации развития человеческого мозга приобрета-

Тэмпл Грандин на встрече со своими поклонниками. Ее работы основаны на необычной привязанности к животным

ет все бóльшую силу. Насколько уместна такая идея? Назрел вопрос, стоит ли диагностировать СДВГ при проявлении у человека гиперактивности и импульсивности.

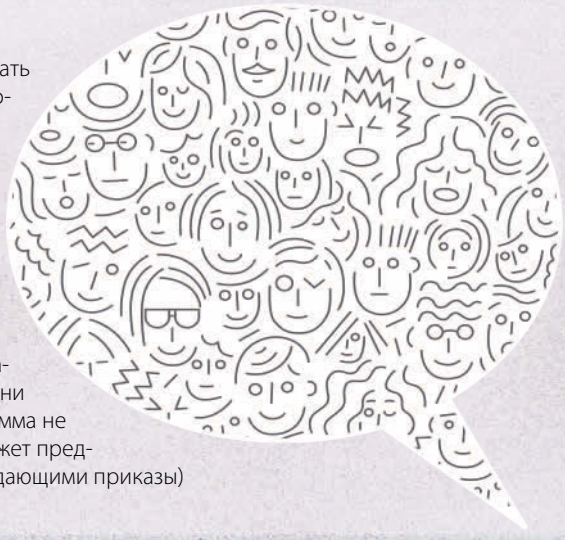
С другой стороны, *шизофрения* — деструктивное расстройство, зачастую разрушающее жизни. Тем не менее с некоторыми общими симптомами, такими как галлюцинаторные голоса, разум и мозг сталкиваются чаще, чем кажется на первый взгляд.

В поддержку нейроразнообразия можно привести два научных доказательства:

- поддержание ряда различных способностей может выступать эволюционным преимуществом для популяции;
- бóльшая часть головного мозга организована по модульному принципу, поэтому у разных людей могут быть развиты совершенно разные модули.

Одна из задач нейробиологии будущего заключается в более глубоком изучении разнообразия типологии людей. Пока что эта тема в наибольшей степени разработана психологами, но их классификации типов личности все еще довольно ограничены и субъективны.

ГОЛОСА В ГОЛОВЕ



В 1987 году голландский психиатр Мариус Ромм попросил телезрителей написать ему, если они когда-либо слышали голоса — диагностический критерий шизофрении. Он получил отклики от 700 людей, описавших самогенерируемый приток слуховой информации, и был невероятно поражен тому, что 500 из них научились контролировать голоса в повседневной жизни и никогда не обращались за психиатрической помощью.

Он понял, что появление голосов является следствием конкретной пережитой психологической травмы, например жестокого обращения в детстве или смерти близкого родственника. Эта идея (наряду с доказательствами из культур, где слуховые галлюцинации подвергаются меньшей критике, чем на современном Западе) привела к созданию «Сети слышащих голоса». Эта организация, работающая в 30 странах, побуждает людей говорить о голосах, которые они слышат, делиться тем, что они говорят, без осуждения и стигматизации. Программа не заменяет медицинскую помощь людям с особо тяжелыми случаями, однако может предложить стратегии совладания (например, ведение переговоров с голосами, отдающими приказы) для людей с подобными отклонениями от нейротипичного образа жизни.

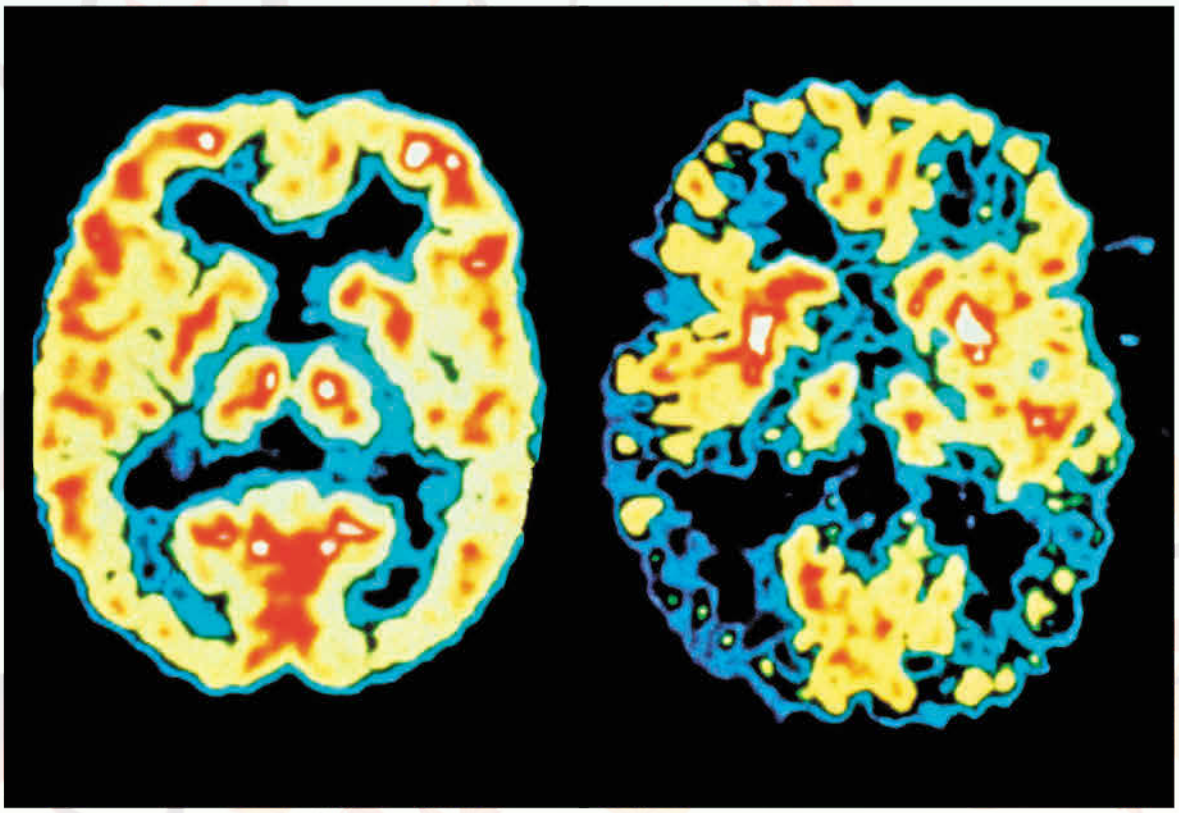
Борьба с деменцией

Устойчивое выражение «потерять голову» может отражать суровую реальность, когда в результате повреждения тканей головного мозга происходит распад психических и познавательных функций. Дегенерации, обычно приводящая к неуклонно прогрессирующей деменции, может быть обусловлена целым рядом факторов, включая генетическую болезнь Гентингтона и множество микроинсультов.

Самый распространенный вид деменции — *болезнь Альцгеймера* — сильно контрастирует с психическими расстройствами, поскольку может быть диагностирован по вполне однозначным биологическим признакам, правда, не всегда при жизни пациента. Может ли подробное изучение изменений в тканях головного мозга предотвратить, отложить или облегчить симптомы (потеря памяти, спутанность сознания, личностные изменения), все больше и больше поражающие стареющее поколение? Например, по предварительным данным, к 2020 году в США болезнь Альцгеймера охватит 14 млн людей.

Несмотря на глубокое понимание механизмов и принципов работы головного мозга, рассматриваемый случай требует дальнейшего изучения. В настоящее время еще не достигнуто полное понимание причин болезни. Известно, что β-амилоидные нити одного белка слипаются в плотные образования — *β-амилоидные бляшки* — и накапливаются между нейронами, в то время как другие скопления, образованные из β-белка, формируются внутри них. Нейроны погибают, и объем голов-

Фибриллы β-амилоидного белка могут образовывать плотные бляшки между нейронами



Левый снимок принадлежит нормальному мозгу, а правый отображает некроз тканей на последней стадии болезни Альцгеймера

ного мозга уменьшается. Комплекс менее выраженных процессов также играет роль в возникновении заболевания, однако ключевой фигурой в запуске необратимых изменений являются именно скопления белка. Согласно основной гипотезе, они возникают вследствие приобретения белками ненормальной формы, что меняет их взаимодействие с другими белками. Они спутываются и мешают утилизации клетками ненужных белковых соединений — образуется «белковый мусор». Подобные процессы отмечены на поздней стадии болезни Гентингтона, прионной болезни Крейтцфельдта — Якоба и губчатой энцефалопатии крупного рогатого скота (коровьего бешенства).

Изменения в гене предшественника β-амилоида могут привести к раннему развитию болезни Альцгеймера, поскольку играют важную роль в выживании нейрона и восстановлении после повреждений.

Основная цель исследования — найти способы устранения «белкового мусора» для предотвращения повреждений. К сожалению, в настоящее время мы не знаем, как этого добиться. Тем временем лекарства от болезни Альцгеймера повышают уровень нейротрансмиттеров, укрепляя взаимодействие между оставшимися нейронами, однако это имеет только умеренный эффект и только на короткое время.

Mundus Intellectualis
DEUS
Seraphin
Filius
Spiritus Sanctus
Pater
Cherubin
Vita
Sapientia
Ab utroque procedens
Vita genitrix
Dominationes
Potestates
Throni
Mundus imaginabilis
Virtutes
Principatus
Archangelos
Angelos
Umbra Terra
Umbræ Aquæ
Umbra Aer grossi
Umbra Aeris tenuis
Umbra Ignis
Custos
Memoria
Visionum
Mundi elementa
Mundi elementorum & elementatorum rerum imagines capiens
Sensitiva
Imaginativa
Mens
Intellectus
Ratio
Æstimativa
Cogitativa
Hic Anima est
Vermis
Mundus sensibilis
Terra
Aqua
Aer grossus
Aer tenuis
Lux seu Ignis
Est enim
Memorativa
Motiva
Visus
Auditus
Odoratus
Gustus
Tactus

Глава 11

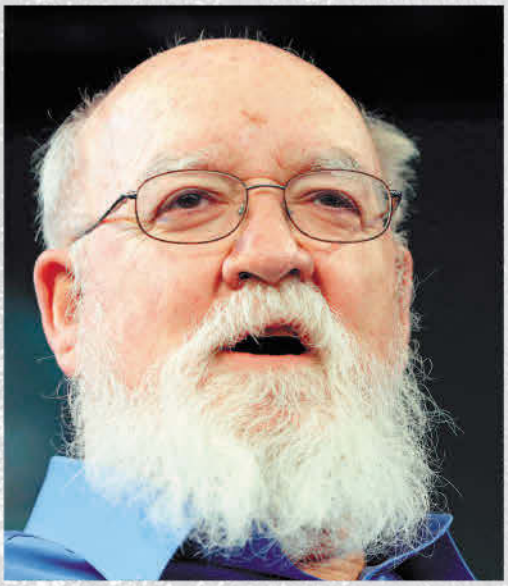
АВТОПОРТРЕТ НАУКИ

Зигмунд Фрейд считал, что наша психика в основном бессознательна

Познай себя

Стремление познать самих себя, свой мозг выступает лучшим стимулом для развития нейробиологии. Часть самовосприятия исходит из телесности, но целая картина восполняется мозгом. Вспомните о пересадке органов: согласитесь, невероятная польза для реципиента! А как насчет пересадки мозга? Вы определенно не захотите стать реципиентом чужого мозга.

Но как получается, что каждый человек воспринимает себя отдельной личностью со своей личной историей и идентичностью, характеризующей его на протяжении всей жизни? Нейробиология солидарна с точкой зрения Зигмунда Фрейда, что бóльшая часть нашего «Я» не осознается. У мозга нет необходимости информировать нас о своей деятельности. Кроме того, сознание — своего рода вишенка на нейронном торте — долгое время не являлось достойным предметом для обсуждения в научных кругах. Наряду с предположением большинства ученых о появлении сознания в свете нейронных событий, существовало также множество работ без углубления в философские дебри о причинах возникновения сознания у мозга.

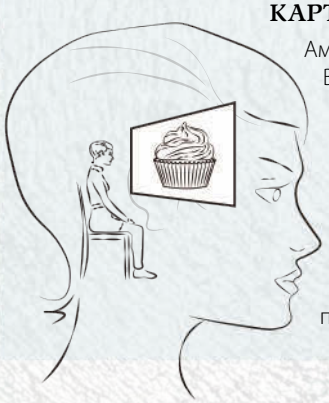


Дэниел Деннет

Но концепция изменилась. На сегодняшний день исследователи нацелены на поиск нейронных коррелятов сознания и изучение бессознательных процессов. Их интерес охватывает дифференциацию основных состояний, таких как состояние бодрствования или сна, механизмы внимания и осознанности, распространяется на локализацию областей головного мозга, вовлеченных в формирование интегрированного сознательного «Я», ведущего свою деятельность во внешнем мире и обладающего автобиографией.

Исследование освещает множество вопросов и раскрывает способы манипуляций сознанием. Насколько мы близки к пониманию истоков возникновения сознания? Как поддерживается чувство единства «Я»? Ученые ведут бурные обсуждения в поисках ответов на представленные вопросы.

КАРТЕЗИАНСКИЙ ТЕАТР

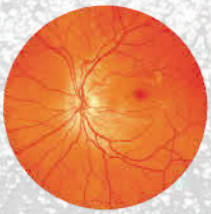


Американский философ Дэниел Деннет отрицает существование внутреннего «я». В своей амбициозно озаглавленной книге «Объясненное сознание» он пишет, что приверженцы большинства теорий о существовании сознания заявляют о присутствии в головном мозге своего рода проекционного экрана — и все чувственные данные, в некоторой последовательности проецируемые на него, сопутствуют нашему сознательному восприятию. Философ отмечает, что очевидный изъян этого изображения заключается в отсутствии наблюдателя внутри.

Дэниел Деннет назвал свою теорию «картезианским театром», явно ссылаясь на пережитки дуализма души и тела философской концепции Рене Декарта XVII века.

Обрати внимание!

Осознанность подкрепляется извлечением необходимой информации из потока сенсорных стимулов. Это противоядие против того, что Уильям Джеймс так красноречиво назвал «цветущей оживленной спутанностью» мира.



Зрительные рецепторы покрывают всю сетчатку, однако их плотность наиболее высока в центре

Предметом изучения многих исследований выступают механизмы внимания (главным образом в зрительной системе). В ходе оригинальных экспериментов с использованием методов регистрации электрической активности ключевых областей головного мозга удалось зафиксировать важные особенности его работы.

Глаз быстро нацеливает на предмет интереса небольшое центральное углубление сетчатки — центральную ямку. Благодаря высокой концентрации клеток эта ямка характеризуется наибольшей остротой зрения. Наряду с совершением быстрых непроизвольных движений (*саккад*) наши глаза могут осуществлять сознательные движения. Любой физический контакт напомнит вам о том, сколько информации можно узнать из направления взгляда собеседника.

Тем не менее существует компонент зрительного внимания, обособленный от движения глаз. В 1970–1980-х годах исследователям удалось обнаружить в головном мозге «прожектор», фокусирующийся на конкретной области поля зрения, отличной от направления центральной ямки. Однако представленная метафора может ввести в заблуждение, поскольку подразумевает подсвечивание деталей, а не отбор поступающей информации.

Внимательность к актуальной в каждый отдельный момент информации помогает выживать при быстроменяющихся условиях

Во время типичного эксперимента у людей примерно на 50 мс быстрее срабатывает реакция на нажатие кнопки при сопровождении света зрительным ориентиром в месте его появления. Суть эксперимента заключается в отображении зрительного ориентира прямо перед возникновением света, чтобы не дать глазам совершить движение. Каким-то образом внимание переключается, в то время как глаз остается в неподвижном состоянии. Сложно объяснить причину происходящего без выполнения головным мозгом своей работы, поскольку именно он отвечает за обработку изменений поступающей зрительной информации.

Приведенный аспект внимания объясняет, как мы можем наблюдать за чем-либо «краем глаза». Мы передвигаем наш «прожектор», будучи сосредоточенными на другом объекте, тем самым скрывая наше наблюдение.

Воплощение реальности

Нам кажется, что мы «схватываем сцену» с первого взгляда, однако наш мозг демонтирует ее, а затем повторно собирает

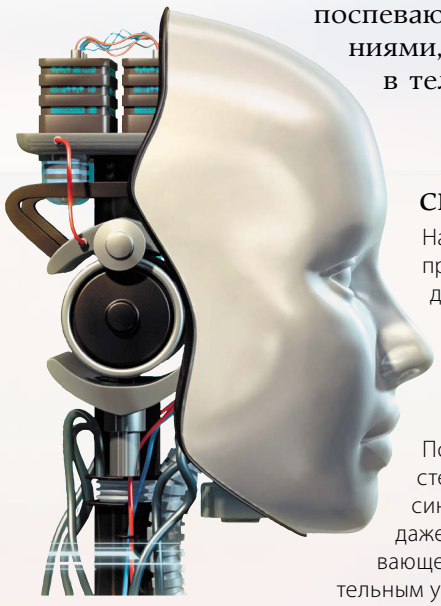
При изучении зрительного внимания становится ясно, что головной мозг разбивает мир, как сенсорную информацию, на мельчайшие детали, подвергая каждую из них анализу. Затем зрительной системе необходимо собрать воедино актуальную картину того, что видит наблюдатель. Этот процесс пока что не изучен до конца (подробнее см. гл. 5).

Что бы ни отвечало за сознание, аналогичным образом необходимо осмыслить и сформировать полную оценку ситуации, в которой оказался хозяин мозга. В теории зрительного восприятия данный вопрос раскрывается под понятием «*проблема связывания*» — объединение разобщенной информации, обрабатываемой разными элементами, в единое целое.

Зрительная система представляет сцену, которую «строит» наш головной мозг в качестве интерпретации «реальности». Точно так же наше сознание представляет собой набор из суждений, множества сопоставленных отдельных элементов и гипотез, рассматриваемых как непреложные умозаключения.

Рассмотрим два примера разного уровня сложности. Зрительное внимание сопряжено с постоянными быстрыми движениями глаз — примерно три раза в секунду, 150 000 раз в день. В то же время мы можем наблюдать за движущимся объектом, совершенно не задумываясь о механизме, который направляет наши глаза (или читать строчку текста, не обращая внимания на то, как глаза поспевают за нами). Мозг одновременно управляет движениями, одними из самых быстрых мышечных сокращений в теле, и препятствует их осознанию.

Порой робот — это просто робот



СИНДРОМ КАПГРА

Наглядным примером того, что сознание конструируется мозгом, выступает синдром Капгра, при котором больной не узнает своих близких родственников или друзей (возможно, даже домашнего питомца). Происхождение расстройства выходит за пределы зрительного распознавания, как в случае с прозопагнозией. У людей с синдромом Капгра сохраняется способность узнавать знакомые лица, но эта способность не сопровождается соответствующим эмоциональным откликом. Возможно, причина кроется в нейродегенеративном состоянии.

Подобное разделение двух каналов поступающей информации, обычно связанных вместе, может привести человека в замешательство или ввести в депрессию. Зачастую при синдроме Капгра больные уверяют, что члены их семьи являются самозванцами, возможно даже роботами, назначенными исполнять роль их родственников. Мозг, сталкиваясь со сбивающей с толку информацией, сочиняет историю, которая затем становится прочным сознательным убеждением.

Уснуть, быть может, сны увидеть

С точки зрения нейробиологии сон — потрясающее состояние, характеризующееся подавлением сенсорно-моторных функций. Он является неотъемлемой частью установленного режима работы мозга, отчасти потому, что, согласно новейшим исследованиям, нахождение в состоянии сна способствует ***консолидации памяти***, т. е. сохранению информации в долговременной памяти.

Испытуемый спит, однако на ЭЭГ наблюдаются быстрые колебания электрической активности

Необходимо отметить, что сон способствует изучению сознания. Во время сна мы видим последовательность образов, возникающих внутри головного мозга с перекрытыми сенсорными входами.

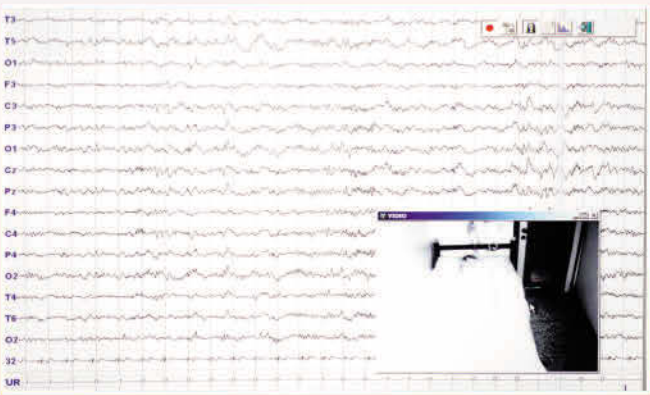
Многие люди слышали, что бóльшая часть ярких и насыщенных сновидений приходится на фазу *быстрого движения глаз (БДГ)*. На ЭЭГ спящего человека в этой фазе проявляется активность, свойственная состоянию бодрствования мозга.

Сон можно также изучать, пробуждая людей ото сна после снятия ЭЭГ и спрашивая, видели ли они сновидения. Так экспериментаторы обнаружили, что сновидения сопровождаются активацией задней части коры головного мозга с переходом от медленных мозговых волн к более быстрым циклам. Руководствуясь показаниями ЭЭГ, можно предположить, в какой момент человек видит сны.

При описании увиденного сновидения электрическая активность головного мозга меняется в областях, коррелирующих со специфическими характеристиками сна, такими как распознавание определенных лиц, ощущение движений или способность слышать голоса. Как и ожидалось, эти области совпали с теми, которые активировались бы у испытуемых в реальной жизни во время бодрствования.

Представленные результаты согласуются с теорией профессора Алана Хобсона о «*протосознании*», согласно которой сновидение представляет собой генеральную репетицию сознания: когда мозг грезит, он сотворяет виртуальную модель мира. Во сне проигрывается интеграция систем, на которые опирается сознание. Однако вместо принятия на себя бремени обработки сенсорной информации и извлечения памяти, сопровождающих жизнь в состоянии бодрствования, мозг активируется сам и порождает собственную оригинальную информацию.

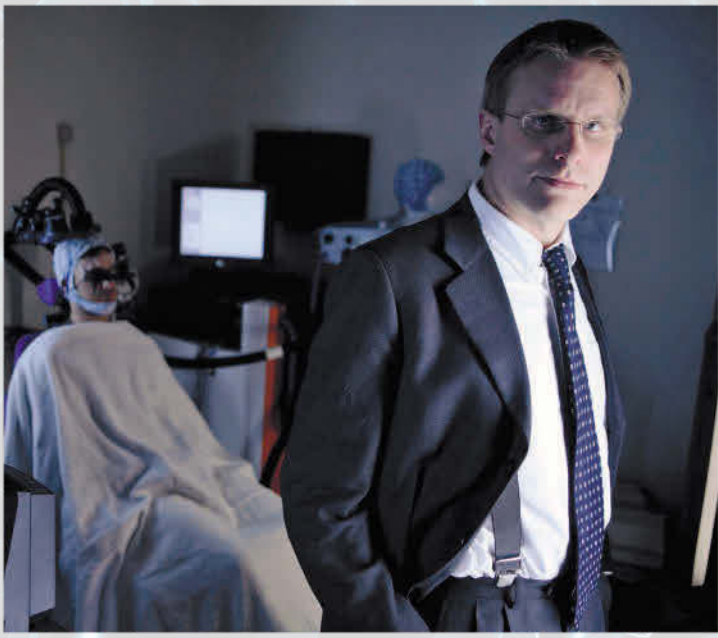
По показаниям ЭЭГ можно предположить момент возникновения сновидений и даже установить вид сновидения



Суть теории заключается в тесной взаимосвязи сознания в состоянии бодрствования и мозговой активности во время сна.

Измерения сознания

Если сознание — это предмет, то наука хочет этот предмет измерить.



Джулио Тонони

Индекс пертурбационной сложности представляет собой теорию сознания, предложенную нейробиологом и психиатром Джулио Тонони из Университета Висконсина в Мэдисоне. Он предположил, что сознание возникает во время передачи информации между множеством различных областей головного мозга и может быть измерено путем оценки интегрируемого объема информации.

В 2013 году команда ученых из Университета Милана в Италии поддержала его воззрения. Для ускорения нейронной обработки они посылали кратковременный электрический ток с помощью транскраниальной магнитной стимуляции, а затем в течение последующих 300 мс считывали активность по всей коре головного мозга через 60 ЭЭГ-датчиков.

Многоканальная ЭЭГ считывается с подобной шапки с электродами

В основу процесса обработки и анализа сигналов лег *алгоритм Лемпеля — Зива*, где интегральный индекс сознания определили как «нормализованную меру сложности вызванного пространственно-временно́го паттерна активности коры головного мозга».

Индекс позволил с высокой точностью разграничить испытуемых, находящихся в ясном сознании, во время сна со сновидениями, в состоянии глубокого сна или под воздействием седативных веществ разной степени выраженности эффекта. Эти состояния были упорядочены по индексу, как и следовало ожидать, от самого высокого до самого низкого. Самый высокий индекс среди испытуемых в ясном сознании был равен 0,67, а самый низкий — 0,44. У добровольцев под сильной анестезией индекс пертурбационной сложности варьировался от 0,1 до 0,3. Отдельные исследования испытуемых под воздействием ЛСД продемонстрировали показатель выше нормы (подробнее см. гл. 9).

Эксперимент доказал, что такой математически сложный, довольно неточный, но эффективный метод позволяет измерить нечто существенное, что относится к сознанию. Помимо теоретического интереса индекс может помочь определить, в сознании ли человек, находящийся в коме или в вегетативном состоянии. Пациенты с *синдромом запертого человека* продемонстрировали индекс от 0,5 до 0,6 — показатель того, что они находятся в сознании, но не могут общаться.

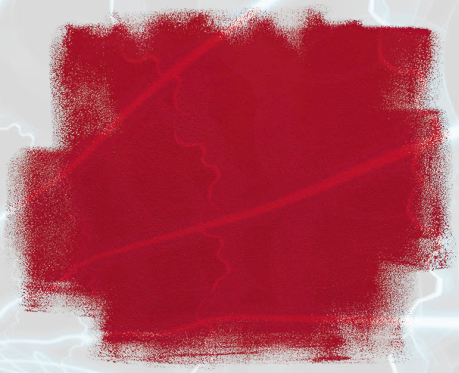
Трудная проблема

Сэр Роджер Пенроуз

Отслеживание паттернов активности в нейронах способствовало открытию областей головного мозга, связанных с сознанием, однако не совсем понятно, каким образом. Подобного метода исследования придерживается не каждый. Так, например, физик сэр Роджер Пенроуз предположил, что сознание и свобода воли зависят от нейронных компонентов, возможно от затейливого переплетения белков в микротрубочках под влиянием квантово-механического эффекта.

Однако среди его сторонников было недостаточно исследователей, нацеленных на изучение видов нейронной активности, фигурирующих в данной книге. Как правило, они признают, что наиболее значимая сторона сознания остается вне поля действия их экспериментов. В 1995 году Дэвид Чалмерс ввел понятие «*трудная проблема*» для обозначения проблемы сознания, с которой наука не в состоянии справиться. Предположим, вы собрали полный отчет о передаче нейронных сигналов при взгляде на ярко-красную стену, подключили связанную с данной деятельностью работу внимания, зрительную обработку, реинтеграцию и осознание результата. Согласно Чалмерсу, это можно отнести к (относительно) легкой проблеме(-ам), которая(-ые) в принципе поддается(ются) решению. Но все это не передаст не различающему цветов человеку ощущения, каково это — видеть красный цвет.

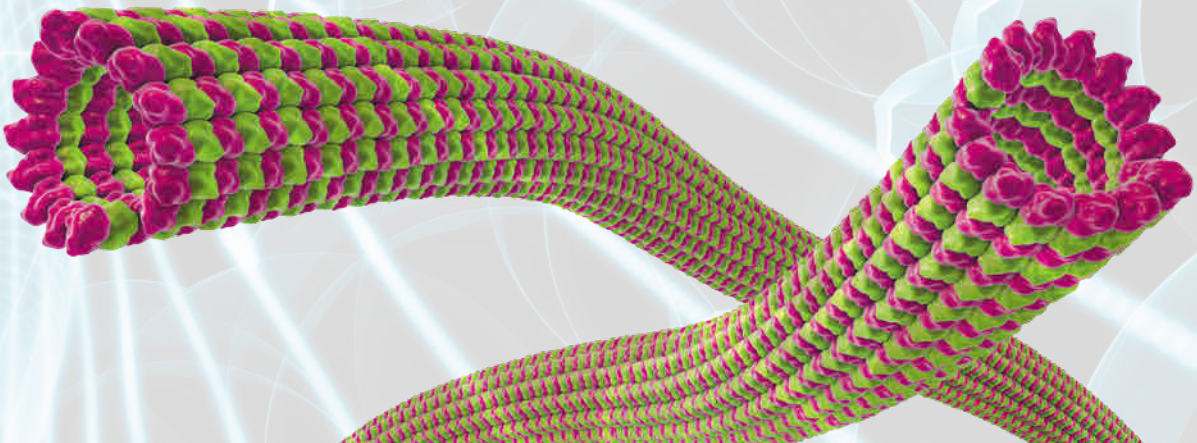
Ощущение видения красного цвета знакомо всем. Но как нам передать свой опыт людям, не различающим цветов?



Похоже, что самая таинственная сторона субъективного опыта заключается в том, что невозможно описать переживания от восприятия красного цвета человеку, который никогда не видел его сам. Сенсорные явления, составляющие наш опыт (классический пример — созерцание красного цвета), обозначают термином «*квалиа*» — восприятие в себе и само по себе. Представьте дегустацию вин: каждый нюанс восприятия самого ароматного букета мы сравниваем со вкусом или запахом чего-то еще. Язык универсален, но система значений замкнута.

Некоторые философы отрицают, что трудная проблема имеет ключевое значение, и верят, что объяснить сознание можно будет в обход этой проблемы. Возможно, одержимость простыми ощущениями слишком ее упрощает. Однажды выдающийся математик поделился методом своей работы: чтобы найти решение трудной задачи, необходимо прокручивать ее в голове на протяжении целого дня. Его слова понятны, но если его метод применит человек с менее богатым математическим опытом, вряд ли ему удастся найти решение.

Микротрубочки обеспечивают транспортные связи внутри клеток. Можно ли связать их с сознанием?



Робин Данбар

Мы знаем, что ты знаешь

Николас Хамфри

Установление причин и механизмов появления самосознания выступает второй «трудной проблемой» сознания. В 1990-е годы археолог Стивен Митен в своей публикации «Предыстория разума» утверждал, что следы, оставленные нашими предками, едва ли отображают способность сочетать разные когнитивные способности при изготовлении орудий труда, для распознавания других видов в своей экосистеме или же в социальных целях. По мнению Митена, сознание позволяет применять одну и ту же информацию в разных сферах деятельности. Ученый полностью солидарен с гипотезой британского нейропсихолога Николаса Хамфри и антрополога Робина Данбара, которая гласит, что наше самосознание, вероятно, появилось, чтобы помочь справиться со сложностями жизни, возникающими в результате увеличения популяции.

«Понимание работы собственного разума приводит к пониманию работы разума другого человека, — комментирует Хамфри. — Эта хитрость неподвластна другим живым существам. Модель разума позволяет нам предугадывать реакции других людей и справляться со сложностями межгрупповых отношений». По мнению Робина Данбара, способность владеть языком содействует расширению и укреплению тех связей между людьми, которые реализуются у приматов в форме груминга (взаимный уход за шерстью друг друга). Используя слова в разговоре, мы «ухаживаем» за другими людьми, расширяя таким образом круг знакомств.

В философии существует такое понятие, как «*интенциональность*». Если один человек знает (или полагает, что знает) о том, что другой человек располагает какой-либо информацией, это один уровень интенциональности. Шимпанзе справляются с этим уровнем и даже, по некоторым сведениям, способны достигать следующего. Благодаря своему развитому мозгу человек способен на большее. Обычно в бодрствующем состоянии каждый может удерживать в памяти около пяти порядков интенциональности. Наличие шести уровней уже потихоньку начинает сбивать с толку. Если мы ломаем голову над чем-то подобным: «Если они думают, что мы думаем, что они это знают, то мы полагаем, что они могут представить, как мы это делаем», — то весьма вероятно, что мы рискуем перегрузить возможности нашего разума отслеживать интенциональность.

Разговоры — основополагающий элемент социальной жизни человека, ключевой механизм понимания намерений других

Другие умы

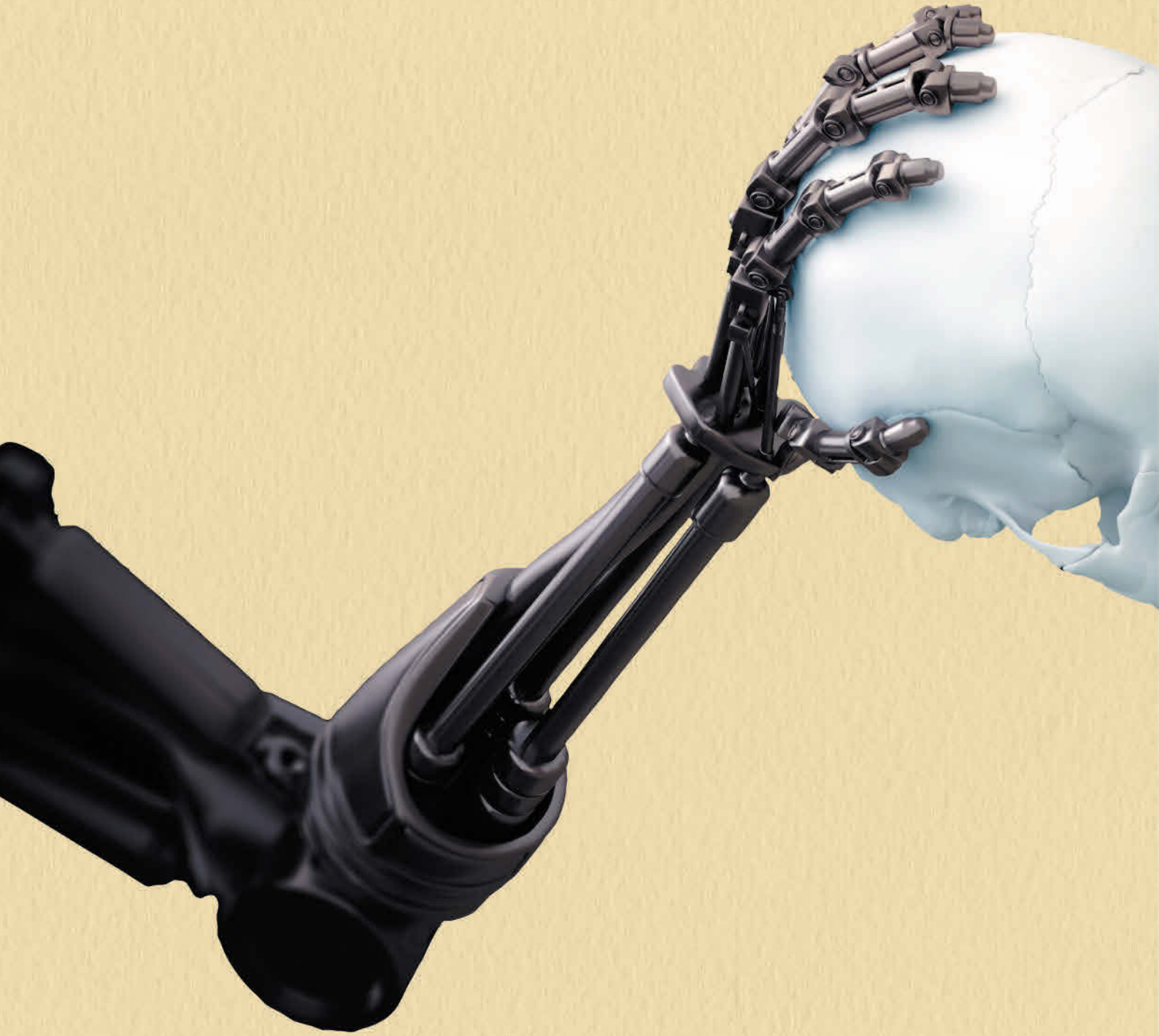
Человек способен сознательно ввести кого-то в заблуждение, одурачить или просто сбить с толку, однако ход его мыслей и переживания от определенных эмоций и чувств выявляют его природу, отражают его сущность, открывая возможность посмотреть на мир его глазами. А, впрочем, о чем думают другие живые существа?

Данным вопросом может задаться только человек. Маловероятно, что собаки размышляют, каково это — быть человеком или котом. Представим некоторые особенности жизни собаки: их острый нюх дополняет городской пейзаж или парк исключительными признаками, недоступными восприятию человека, который в большей степени полагается на зрение. Их квалиа будут отличаться.

Некоторые живые существа отличаются уникальным восприятием. Американский философ Томас Нагель в своей статье поднимает вопрос «Каково это — быть летучей мышью?». Это животное воспринимает мир через эхолокацию; оно способно анализировать сложные ультразвуковые эхосигналы достаточно быстро, чтобы схватить насекомое на лету в пещере, переполненной другими летучими мышами. Нагель пишет: «Любой, кто находился в закрытом пространстве вместе с возбужденной летучей мышью, знает, каково это — встретиться с фундаментально иной формой жизни».

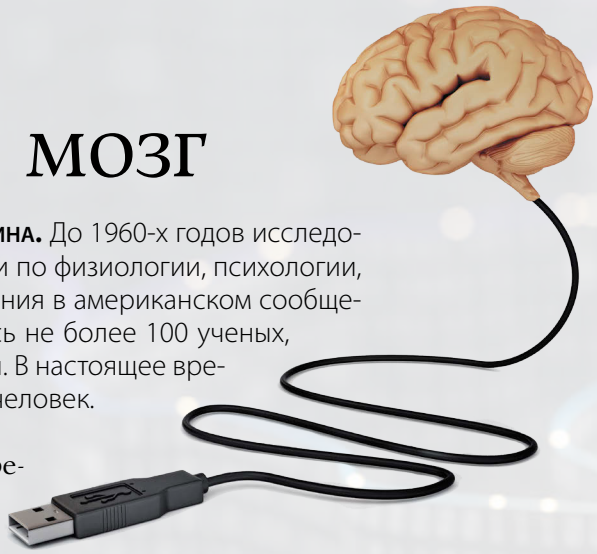
Все же летучая мышь относится к классу млекопитающих, так что давайте попробуем переключиться на представителей других классов. Возьмем, к примеру, осьминога. «Исследователи, испытавшие удачу с близкого расстояния понаблюдать за осьминогами, принимают этих морских обитателей за довольно разумных существ, способных устанавливать зрительный контакт, сопровождать “общение” прикосновениями и осознавать присутствие “чужого”», — отмечает в своей книге «Другие умы» философ и аквалангист Питер Гофри-Смит.

Разум осьминога (если его можно так назвать) и разум человека не имеют ничего общего; последний общий предок головоногих (осьминогов, кальмаров и каракатиц) и других организмов со сложной нервной системой жил 600 млн лет назад. Количество нейронов у осьминога может достигать 500 млн, и большинство из них сосредоточены в щупальцах, оснащенных вкусовыми, обонятельными и осязательными рецепторами. Осьминог живет в мире, в котором вполне естественно иметь восемь ног, сине-зеленую кровь и пигментные клетки на коже, наделенные способностью мгновенно менять цвет. Образ осьминога наводит на мысль: что же это головоногое существо может сказать о человеке?



Глава 12

БУДУЩИЙ МОЗГ, БУДУЩЕЕ НЕЙРОБИОЛОГИИ



Строим новый мозг

Нейробиология — довольно молодая дисциплина. До 1960-х годов исследователи не гнушались называться специалистами по физиологии, психологии, анатомии или науке о мозге. На момент основания в американском сообществе нейробиологии в 1969 году насчитывалось не более 100 ученых, представляющих данную область исследования. В настоящее время ежегодные встречи собирают около 40 000 человек.

Поскольку нейробиология оперирует передовой информацией, задумка посвятить данную главу истории канула в пучину. И, возможно, самые поразительные достижения в изучении работы мозга ожидают нас в будущем. К чему они приведут? Существуют амбициозные и противоречивые предположения о том, реализуются ли они, и если да, то как скоро. Важность головного мозга подталкивает людей на создание различных теорий. Сможем ли мы вносить изменения в процесс его функционирования? Продлить его жизнь? Усовершенствовать? Воспроизвести?

В соответствии с весьма перспективной идеей компьютер расширит возможности головного мозга человека. Самый смелый сценарий предусматривает объединение с технологиями посредством загрузки нашего разума в компьютер и дальнейшее виртуальное существование в этом странном новом мире.

Вряд ли подобная эволюция произойдет в ближайшие десятилетия, скорее через столетия, однако было бы вполне логично предвосхитить усиление взаимосвязей между нейробиологией, информатикой и цифровыми технологиями.

Этот процесс представляет собой двустороннее движение, которое петляет крайне любопытным образом. Проект «Человеческий мозг», финансируемый Европейским союзом, изначально преследовал цель симулировать органический мозг внутри суперкомпьютеров, но про-
енял направление в силу несистема-
ского характера данных и противо-
ивых результатов исследований из
ных областей нейробиологии о том,
ой именно будет эта симуляция.

С одной стороны, симуляция головго мозга будет происходить с по-
щью программного обеспечения
уществующих на данный момент
ифровых компьютеров. С другой
тороны, есть проекты по созданию
омпьютеров, способных перенять
ринципы работы головного мозга,
это, в свою очередь, подразумева-
параллельную обработку данных,
тирание границ между памятью
обработкой и еще более радикаль-
ные изменения. Возможно, настанет
день, когда эти две ветви сплетутся
воедино и откроют врата для прямого общения мозга и компьютера.

«Мозг» червя

Сидней Бреннер наблюдает за червем

Сумма инвестированных в проект денег позволяет судить о степени его значимости и грандиозности. Так, например, бюджет исследований головного мозга не поддается оценке. Даже если бы нам удалось отобразить весь человеческий коннектом (подробнее см. гл. 1), то что бы он смог нам рассказать?

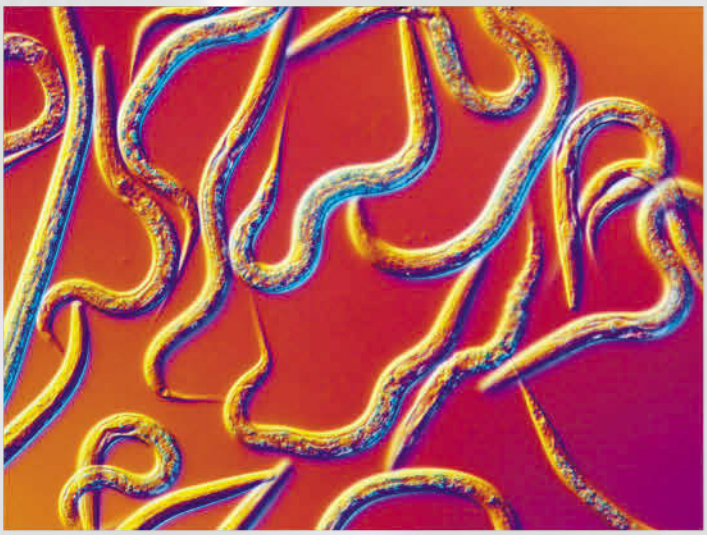
Объекты исследований научных проектов прошлого могут служить ключом к понимаю этого. В далеком 1963 году Сидней Бреннер выбрал в качестве модельного организма *Caenorhabditis elegans* — одного из представителей нематод (круглых червей), — чтобы восполнить пробелы между нейробиологией и молекулярной биологией, бурно развивавшейся после открытия структуры молекулы ДНК десятилетием ранее.

Ученый направил свои силы на создание полной карты строения нервной системы круглого червя и в результате его цель была достигнута. Сейчас в нашем распоряжении полный геном и карта развития каждой клетки. Червь не имеет мозга, но обладает нервной системой. У самого распространенного гермафродитного вида во всем организме всего 959 клеток, среди которых 302 нейрона.

В процессе героической работы с электронной микроскопией, ручным отслеживанием клеточных соединений и самопрограммируемыми компьютерами в 1984 году удалось создать полную карту этой системы с 8000 синапсов. Отображение карты нервной системы заняло 340 страниц выпуска журнала «Философские труды Королевского общества».

Что за этим последовало? Полное описание структуры связей открыло ученым возможность более тщательно продумать эксперименты по изучению ответных реакций червя на внешние раздражители. Коннектом, как мы теперь его называем, породил огромное количество гипотез, которые следовало проверить, наблюдая за развитием событий при изменении системы, манипуляции с генами или удалении клеток.

Три десятилетия спустя благодаря множеству опубликованных научных работ мы гораздо лучше понимаем поведение и способы восприятия мира столь простого организма, но работа в этой области до сих пор продолжается. В 2012 году удалось получить расширенный коннектом самца червя с 81 дополнительным нейроном. Даже в таком небольшом наборе присутствует более 100 различных видов нейронов.



Нематода обходится несколькими сотнями нейронов, однако предсказать их действия все еще трудно

Как показала данная научная работа, структура связей выступает отправной точкой для дальнейших исследований, как и при рассмотрении коннектома более сложных организмов, таких как позвоночные, с высоким уровнем развития нервной системы.

«Верить в результативность методов обработки огромных массивов данных, полагаясь исключительно на их объем, — примерно то же самое, что пытаться разобраться в работе программы Microsoft Word, пристально разглядывая провода в ноутбуке».

Стремительный рост объема данных

Изучение головного мозга повлекло за собой стремительный рост числовых значений — миллиарды нейронов, триллионы синапсов и др. На сегодняшний день нейробиология генерирует данные с взрывной скоростью, только в сравнении с обычным резким и кратким взрывом этот довольно продолжительный, растянутый во времени.

Нейронную активность необходимо изучать вместе с поведением живых существ: некоторые устроены гораздо сложнее других

Методы визуализации, оптогенетика, основанная на активации и ингибировании нейронов, новые способы регистрации изменений в активности сотен и даже тысяч нейронов за раз у подопытных животных — все это стимулирует накопление информации, которая в дальнейшем позволит ученым приблизиться к пониманию функционирования нейронных сетей.

Избыток данных может привести к эмпирическому кошмару: проблема выяснения взаимосвязи между деятельностью головного мозга и нейронными сетями постепенно переходит в установление значимости огромного объема данных о нейронных сетях. Как выразилась Энн Черчленд из лаборатории Колд-Спринг-Харбор в Нью-Йорке в 2016 году, «неясно, как преобразовать огромные массивы сложных данных в понятные формы». Профессор настаивает на необходимости направить усилия на поиск паттернов среди собранных данных, поскольку простое картирование соединений малоэффективно. В качестве неоспоримого доказательства можно привести недавнее исследование, цель которого заключалась в выведении системы преобразования информации устаревшего компьютерного чипа путем полного моделирования его схемы. По словам Стива Флемминга из Университетского колледжа Лондона, неудивительно, что исследование провалилось: как бы то ни было, но «верить в результативность методов обработки огромных массивов данных, полагаясь исключительно на их объем, — примерно то же самое, что пытаться разобраться в работе программы *Microsoft Word*, пристально разглядывая провода в ноутбуке».

Энн Черчленд

КАРТИРОВАНИЕ НЕЙРОНОВ

Теории и предположения могут возникнуть как из огромного множества дисциплин, включая биофизику и информатику, так и из примеров относительно неплохо изученных нейронных сетей. Важно, чтобы они развивались одновременно с живым существом, выступающим в качестве предмета изучения.

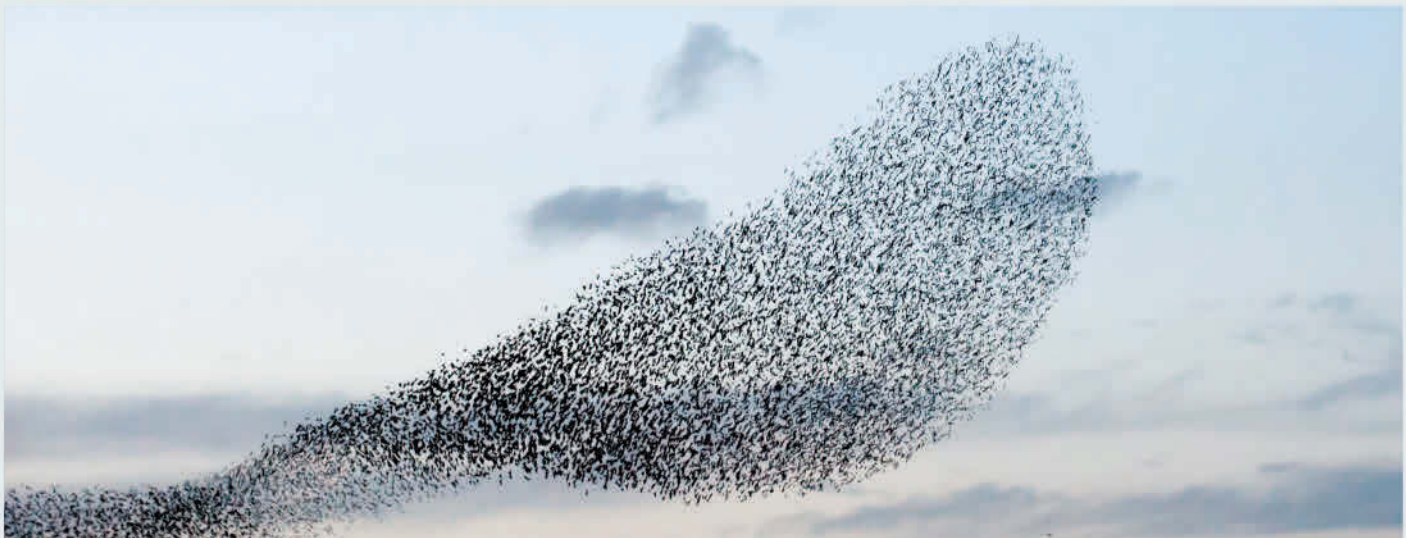
Головной мозг — особый механизм, определяющий человеческое поведение. Он порождает действия, раскрывающие возможности всего организма. Обычно этот процесс связан с безжалостным расчетом естественного отбора. Преимущества развития головного мозга человека по большей части связаны с социальным взаимодействием.

Так или иначе, ключевые теоретические соображения сосредоточены на устранении пробела в понимании взаимосвязи нейронов и поведения. На данный момент исследова-

тели могут связать нейронные сети только с элементарными действиями простейших организмов. Например, понаблюдайте за поведением дрозофилы при дуновении воздуха: она либо запрокинет голову назад, либо повернет ее в сторону. От каких факторов зависит выбор? Нейронное картирование и оптогенетика нашли ответ на вопрос на клеточном уровне.

Изучение более сложных организмов вызывает значительные трудности. Как удачно высказались Джон Кракауэр и его коллеги из Университета Джона Хопкинса в своей критической статье в 2017 году, «как правило, мы не знаем, как именно уровни организации головного мозга связаны с конкретными поведенческими актами». Джон Кракауэр со своими коллегами сосредоточен на изучении головного мозга любых живых организмов, кроме человека, и на поведении, поддающемся систематическому анализу. Анализ может быть так же прост, как и изучение движения нематоды в лабораторном блюдце. А что если рассмотреть грызунов и их инстинкт самосохранения в момент приближения ястреба, летучую мышь и ее способность на лету хватать добычу в сумеречный час или группу макак, ухаживающих друг за другом? Крайне важно разработать эксперименты, нацеленные на определение уровня, превалирующего для интересующего поведения. Неправильное истолкование может сбить вас с пути и ввести в заблуждение. Как сказал британский нейробиолог Дэвид Марр, «попытка понять восприятие через изучение нейронов подобна попытке понять полет птицы, изучая при этом лишь перья».

В основе обсуждения лежит вопрос: что на самом деле значит «понимать функционирование мозга»? При употреблении выражений типа «данная область мозга задействована в осуществлении данной функции» многие ученые уклоняются от ответа. Однако описание нейронных сетей со все возрастающей детализацией не обязательно приводит к пониманию. Критика сторонников данной концепции выступает современным отражением дебатов о том, насколько далеко продвинулся редукционизм (подробнее см. гл. 2). Согласно Кракауэру, вы не сможете понять работу головного мозга, рассматривая при этом каждый нейрон по отдельности, точно так же, как не сможете объяснить *мурмурацию* (т. е. скоординированный полет) скворцов, изучая при этом только одного или нескольких представителей. Понимание возникает при рассмотрении некоторой совокупности. Вы можете рассматривать данный подход как фундаментальную разницу между методами картографов головного мозга и исследователей поведения. Все же возможно, что многое зависит от поставленной цели. В конце концов, Кракауэр и его коллеги по-прежнему считают, что поведение предопределяется работой головного мозга, который использует разного рода алгоритмы и вычислительную обработку, осуществляемую множеством групп нейронов.



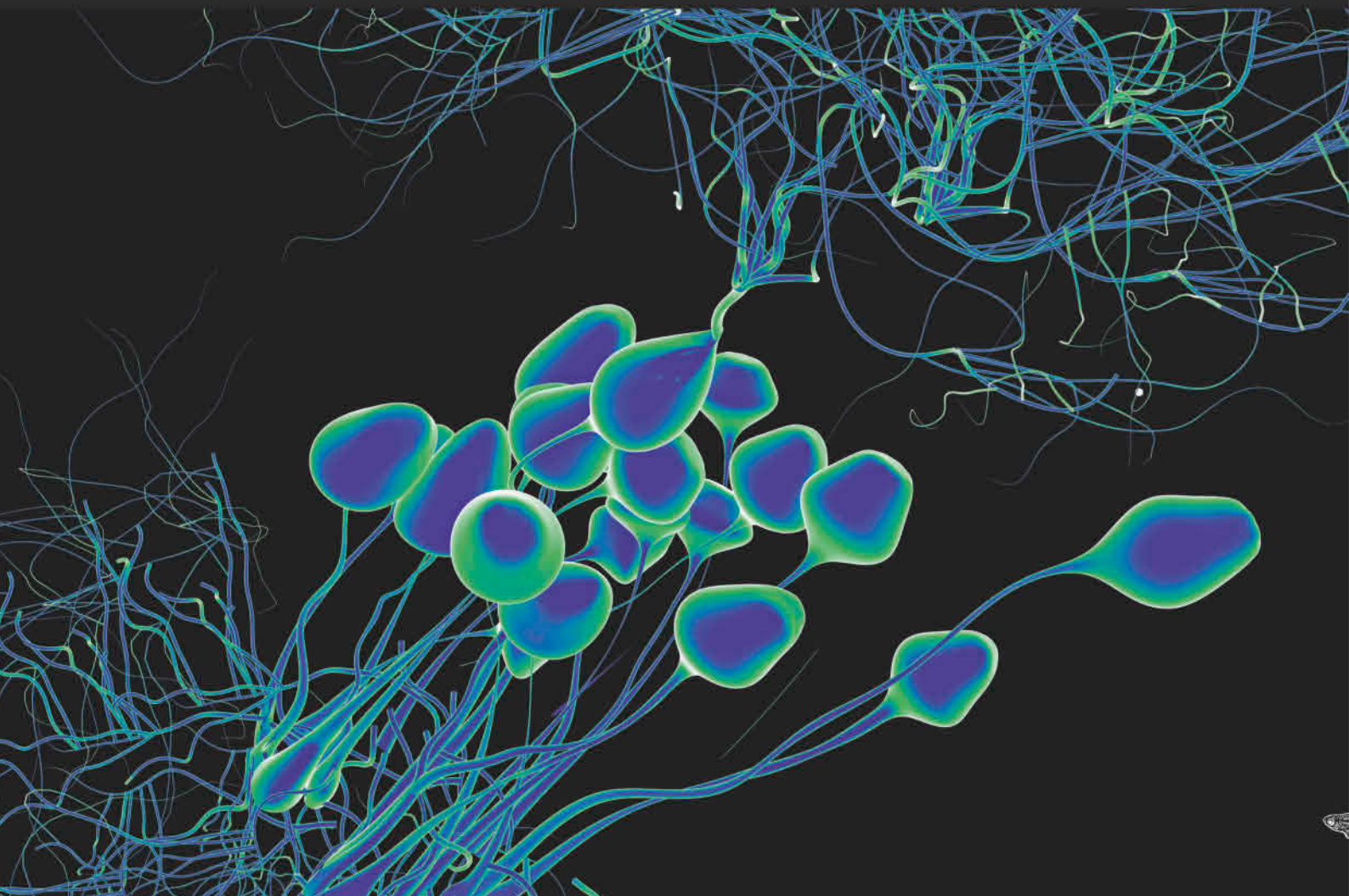
Мурмурация гигантской стаи скворцов складывается из тысячи индивидуальных движений

Игра со свободным доступом?

Информационные банки переполнены изображениями головного мозга и координатами нейронных карт. Компьютеры могут отчасти помочь растолковать их, однако для некоторых видов анализа самым лучшим средством обработки данных остается человеческий мозг. Проблема заключается только в наборе достаточного количества исполнителей для проведения анализа.

Один из способов решения данной проблемы — сделать исследование доступным для всех желающих. Онлайн-доступ к информации позволил непрофессионалам внести свой вклад в некоторые научные области, где данных просто непочатый край, например в галактическую астрономию и биохимию сворачивания белка.

Нейробиология последовала тому же примеру. В 2010 году была запущена онлайн-игра под названием *EyeWire* (дословно переводится как «связи между нейронами в сетчатке глаза»), где основная задача игроков — обрабатывать снимки сетчатки, полученные при помощи электронного микроскопа. Каждый раунд предусматривает восстановление ветвей нейрона в разрезе шириной 4,5 мкм совместно с алгоритмом. Человек устраняет погрешности, способные сбить компьютер с толку, и участвует в состязаниях за



Увеличенное изображение нейронных столбиков в головном мозге рыб вида данио-рерио

право перехода на новый уровень игры. Сотни тысяч игроков помогли создать первую 3D-карту сетчатки глаза мыши. В 2017 году была выпущена обновленная версия игры — картирование нейронов у пресноводных рыб вида данио-рерио.

В игре *Mozak* (с сербохорватского языка переводится как «мозг»), созданной командой ученых из Университета Вашингтона, игрокам необходимо классифицировать нейроны по форме их клеточных тел, аксональных связей и дендритных деревьев. Все эти компоненты крайне разнообразны, и существует неизведанное многообразие форм, которые могут принимать индивидуальные нейроны и их соединения. Тщательно разработанный каталог этих форм поможет понять, за что отвечает тот или иной тип клеток и как их функционирование может нарушиться. Игроки помогают построить каталог путем воссоздания соединений индивидуального нейрона в 3D, а для этого необходима сноровка. Новые участники постепенно набираются опыта, рассматривая и осуществляя реконструкцию одиночных нейронов. Для минимизации ошибок каждую клетку воссоздают как минимум пять игроков. Разумеется, профессионалы тоже могут присоединиться к игре: некоторые из них даже обнаружили, что при помощи интерфейса, разработанного для игры, им удается выполнять работу быстрее. Игра предлагает для изучения огромное количество данных; при наличии 86 млрд нейронов игрокам уж точно есть где разгуляться.

Картограф головного мозга Себастьян Сеунг помог разработать игру EyeWire

Управление нейронами

Пока разработчики игры занимаются ее продвижением, ученые разработали проекты по улучшению манипулирования уже существующим мозгом. Основная цель — научиться управлять отдельными нейронами, временно отложив в сторону проблему установления их деятельности. В настоящее время добиться этого можно с помощью микроэлектродов, которые имплантируют в головной мозг. Использование оптогенетики куда более эффективно (подробнее см. гл. 2), однако, поскольку биологические ткани не пропускают свет видимого спектра, приходится вводить в головной мозг оптоволокно через отверстие в черепе.

Альтернативным методом является клеточная инженерия посредством замены рецепторов, реагирующих на специализированные химические вещества вместо световых сигналов, а в случае с нейронами — адаптация рецепторов нейротрансмиттеров к новому мессенджеру. Такой рецептор получил название *DREADD* — синтетический рецептор, который активируется исключительно синтетическими веществами.

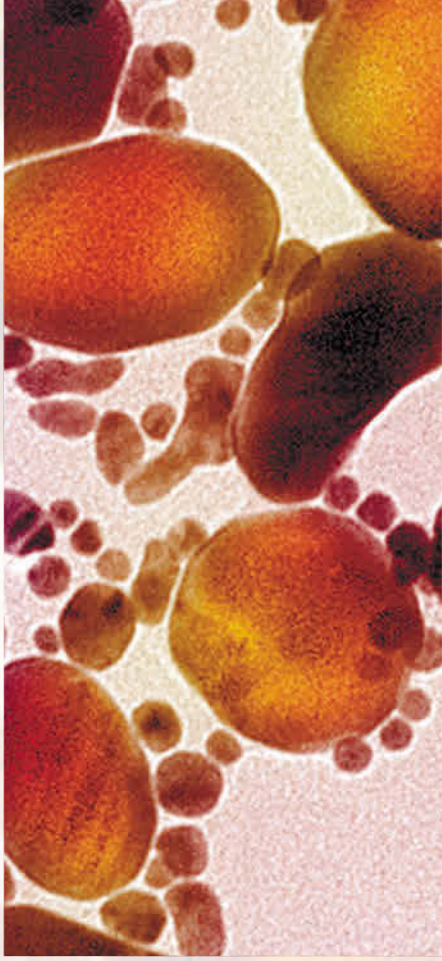
В экспериментах над животными использовали модельную систему с измененными ацетилхолиновыми рецепторами, активируемыми органическими соединениями небиологического происхождения для возбуждения или ингибирования нейронов-мишеней в зависимости от конкретного рецептора.

Следует выделить пару недоработок данного метода:

- для изменения клеток используется генетически модифицированный вирус;
- синтетическое вещество можно охарактеризовать как свободно плавающую молекулу, а значит, оно не может быть нацелено так же точно, как световой сигнал.

НАНОЧАСТИЦЫ

Ученые предложили альтернативный способ, который исключает обе проблемы: активация нейронов происходит при помощи введения в клетки металлических наночастиц и их последующего нагрева электромагнитным полем или ультразвуком. Другими словами процесс можно охарактеризовать как «оптогенетика без генетики».

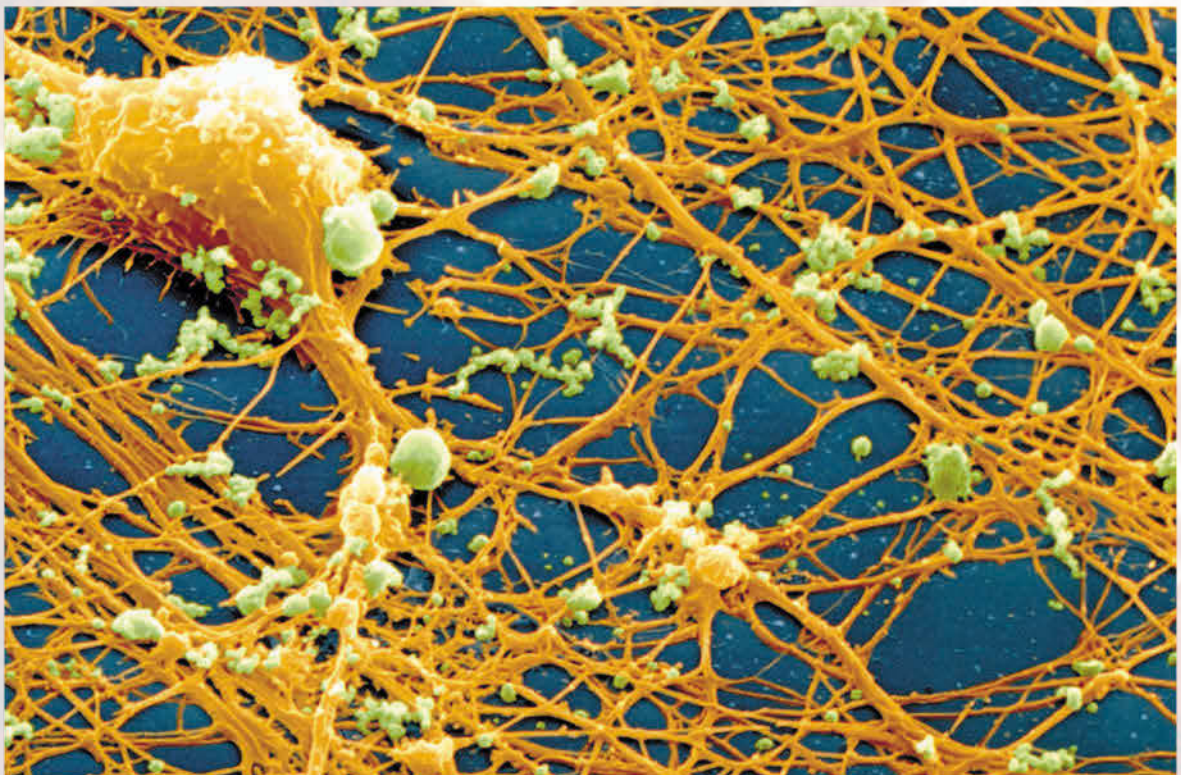


Клетки, включая нейроны, поглощают золотые наночастицы

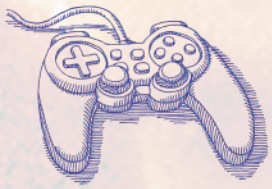
Эта идея пока не была тщательно испытана, но количество примеров работ уже растет (в частности, с наночастицами золота). Для минимизации нежелательных эффектов крошечные металлические сферы или стрежни покрывают специальной инертной оболочкой, что позволяет им захватываться клетками. Затем под воздействием лазерного импульса эти шарики нагреваются.

Согласно отчетам, данный метод стимулировал нейронный рост после поражения спинного мозга через активацию ионных каналов нейронов. Также он помогает стимулировать возбуждение или ингибирование нейронов при их культивировании. Ожидается появление более полной информации об этом методе исследования клеток мозга, поскольку уверенность экспериментаторов в обращении с наноматериалами растет.

Развитие нейронов при культивировании



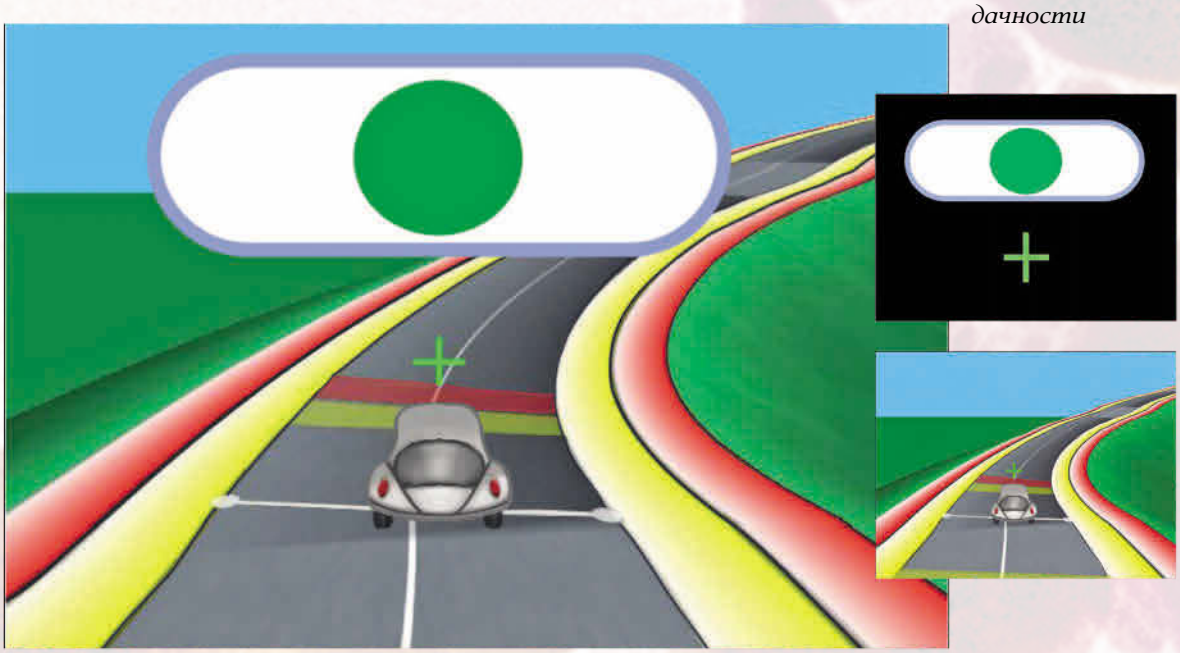
Тренировка головного мозга



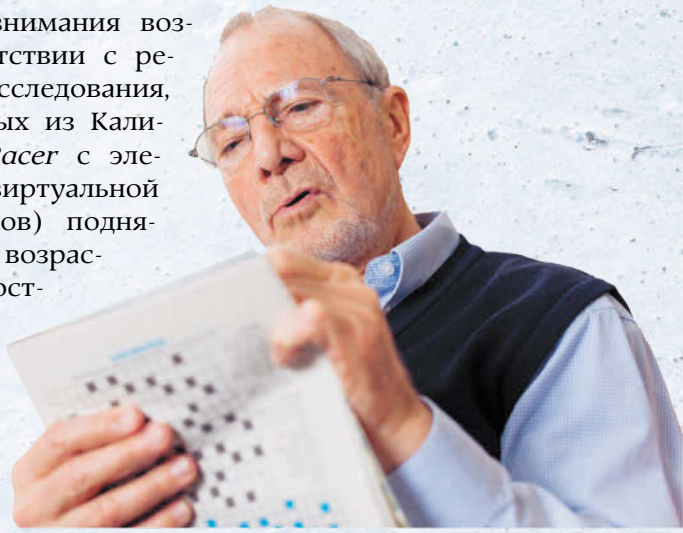
В ПОСЛЕДНИЕ НЕСКОЛЬКО ЛЕТ НАБЛЮДАЕТСЯ ПОПУЛЯРИЗАЦИЯ НЕИНВАЗИВНЫХ МЕТОДОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГОЛОВНОЙ МОЗГ. При изучении головного мозга ученые прибегли к принципу «используй или потеряешь», вдохновившись научными работами по нейропластичности и потенциации синапсов, некоторые продолжили развивать идею, разработав игры для тренировки головного мозга.

Данный вид игр спровоцировал бурные дебаты, отчасти потому, что предприниматели склонны слегка приукрашать качества предлагаемого продукта. В 2014 году было опубликовано открытое письмо с обращением 70 нейробиологов. В письме говорилось следующее: «Потребители уверены, что развивающие игры увеличивают уровень интеллекта, стимулируют концентрацию внимания, а также повышают скорость и качество обучения (запоминания)» — однако едва ли можно найти данные, подтверждающие изложенную концепцию. Широко критиковалась также идея о том, что развивающие игры замедляют возрастное ухудшение когнитивных способностей.

Письмо вызвало критику другой группы ученых из той же области науки. Обе группы согласились с тем, что необходимо провести контролируемые исследования с целью демонстрации преимуществ вне поля деятельности игры. Грубо говоря, выполнение определенной задачи во время прохождения игры может повлиять на улучшение конкретного показателя, но в силу неестественности задачи развитому параметру вряд ли можно найти практическое применение в жизни. К слову, то же самое можно отнести и к «*эффекту Моцарта*» — гипотетическому повышению уровня интеллекта за счет прослушивания композиций великого музыканта. По факту развивается только способность по достоинству оценить его творчество.



Кадр из игры NeuroRacer, используемой для изучения методов развития мультизадачности



Используй или потеряешь

Тем не менее нельзя оставить без внимания воздействие некоторых видеоигр. В соответствии с результатами сравнительно небольшого исследования, проведенного в 2013 году группой ученых из Калифорнийского университета, игра *NeuroRacer* с элементами многозадачности (управление виртуальной машиной во время истолкования знаков) подняла показатели испытуемых преклонного возраста до уровня (неподготовленных) подростков, улучшила концентрацию внимания и укрепила рабочую память.

Последующие работы позволяют говорить о положительном воздействии приложения по распознаванию образов *Game Show* на людей с легкими когнитивными нарушениями памяти, что является ранним признаком деменции. Два часа игры в неделю заметно улучшили эпизодическую память у представителей экспериментальной группы в сравнении с показателями контрольной группы пациентов с аналогичными симптомами.

Научная работа помогла наметить дальнейшие перспективы исследования и сдвинуть фокус на разработку методов предотвращения снижения когнитивных способностей вместо развития определенных способностей всех желающих.

Техномозг

Нет смысла утаивать, что все мы восхищаемся новыми технологиями. Однако в то же время мы испытываем смешанные чувства по поводу их воздействия на наш мозг. Неопределенность перерастает в беспокойство, если речь идет о компьютерах и информационных технологиях.

Обеспокоенная Сьюзен Гринфилд

Чувство тревоги подпитывает давно волнующий страх неспособности угнаться за темпом развития современного мира. Обратимся к более конкретным опасениям в отношении интернета и компьютерных игр в частности.

Нейробиолог Оксфордского университета Сьюзен Гринфилд утверждает, что наш мозг наделен способностью приспосабливаться к окружающей среде, которая на данный момент претерпевает изменения в ранее неизвестных направлениях, поэтому мы должны быть готовы встретиться с непредсказуемыми последствиями.

В своей книге «Изменения разума» (2015) она приводит ряд изменений вследствие технологического прогресса: социальные сети пагубно влияют на коммуникативные навыки людей и снижают способность к эмпатии; игры вырабатывают у игроков расстройство внимания; использование поисковых систем приводит к поверхностному изучению вместо углубления в предмет исследования.

Знания Сьюзен Гринфилд в этих сферах, особенно в играх, несколько ограничены, однако ее исследование освещает актуальные на данный момент вопросы, изучение которых продолжается и по сей день.

Между тем в рамках более ободряющего исследования ученые выяснили, что интернет и другие технологии действительно влияют на наш мозг, который реагирует на происходящие изменения в свойственной ему манере. Разграничить их на положительные и отрицательные на данный момент не представляется возможным, однако есть все основания полагать, что изменения усиливают некоторые возможности нашего адаптивного мозга, а некоторые ослабляют. К примеру, свободный доступ в интернет избавляет человека от необходимости запоминать информацию: вместо этого ему нужно просто запомнить, где ее найти. Взамен мы получаем доступ к гораздо большему объему информации, чем когда-либо прежде.

Пилот при управлении современным самолетом отдает огромное количество информации на обработку компьютеру

Философ Энди Кларк рассматривает технологии, которые наш мозг позволил создать, как способ расширения сферы его возможностей. Развитый мозг, или «расширенный разум», существует по причине того, что наш мозг эволюционировал ради слияния с техникой. Мы делегируем обязанности, ранее принадлежащие мозгу, различным устройствам: часам, картам, карманному калькулятору, смартфону с выходом в интернет. Лень? Нет! Взгляните на это как на прогрессивный метод развития когнитивных способностей.

Уильям Гибсон, автор понятия «киберпространство»

Подключение

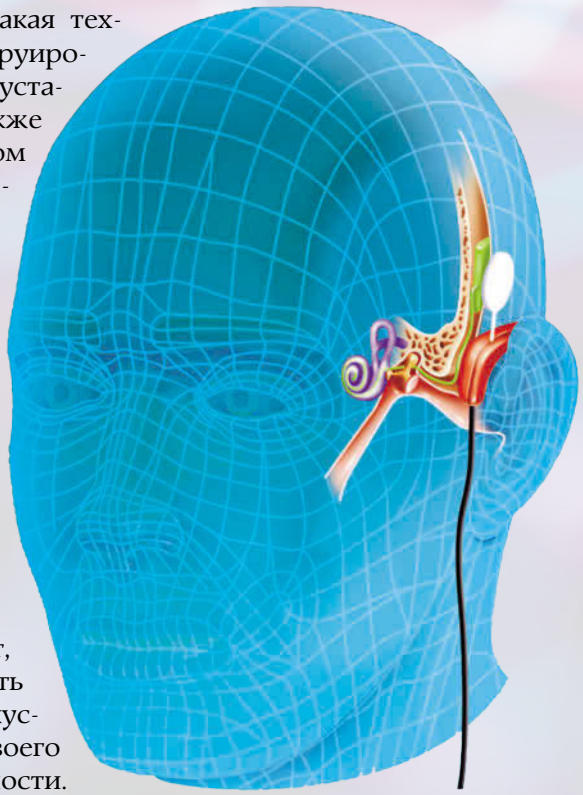
Илон Маск, изобретатель «нейроленты»

Если загрузка вашего разума в гигантский компьютер не является ближайшей перспективой ученых, как насчет противоположного маневра — соединения с машиной для перекачивания информации в голову?

С тех пор как экстравагантный писатель-фантаст Уильям Гибсон описал «подключение» людей к киберпространству (именно он впервые употребил данное понятие в своем романе «Нейромант» для обозначения виртуальной реальности), идея обойти человеко-машинные интерфейсы путем установления прямой связи с компьютером зажгла в некоторых людях огонь надежды. В 2017 году предприниматель в сфере высокоразвитых технологий Илон Маск презентовал новый проект *Neuralink* с целью создать «нейроленту» для соединения с мозгом и воздействовать на индивидуальные синапсы.

Первым делом компания сосредоточилась на оказании помощи людям с черепно-мозговыми травмами путем создания приборов наподобие кохлеарного импланта, позволяющего восполнить утраченный слух через передачу электрических сигналов непосредственно к слуховому нерву, и экспериментальных устройств, которые помогут возродить у людей с пораженной сетчаткой способность «видеть».

Предположительно, «нейроленту» объединят с более глубокими тканями головного мозга и протянут нити к различным частям мозга. На сегодняшний день эксперименты с нейронами, подключенными к компьютерным чипам, или микросхемами, которые используют выращенные из стволовых клеток нейроны, ограничиваются лабораторным столом. Пока нет понимания, как подобные элементы проявят себя внутри реального мозга, поскольку, как правило, живые ткани отрицательно реагируют на искусственные импланты.



Кохлеарные импланты могут компенсировать потерю слуха многих пациентов с тяжелой степенью тугоухости

Представитель компании умалчивает, какая технология, по его мнению, поможет сконструировать достаточно маленький механизм для установления контакта с мозгом изнутри. Также неясно, как можно обойти вопрос, в котором ученые мало что смыслят, о форме кодирования информации, удобной для восприятия и использования мозгом.

Вполне вероятно, что достижения Илона Маска в первую очередь коснутся передачи генерируемых мозгом сигналов на внешние устройства, а не наоборот. В ведении управления по проведению перспективных исследований и разработок Министерства обороны США есть проекты, которые могут поспособствовать этому.

Илон Маск ставит перед собой весьма амбициозные цели, выходящие за рамки управления системами оружия. Он верит, что однажды «нейролента» будет выступать посредником нашего взаимодействия с искусственным интеллектом, который по мере своего развития превзойдет человеческие способности.

Расширение чувств

Нейрокомпьютерные интерфейсы по большей части спекулятивны, однако более базовый подход наметил перспективу расширения наших чувств.

Дэвид Иглмен из Стэнфордского университета уверяет, что мозг обладает обобщенной способностью обрабатывать информацию, которую подают наши органы чувств. Мы можем адаптироваться к новым поступающим сигналам точно так же, как незрячие люди учатся читать шрифт Брайля посредством тактильных ощущений.

По мнению Дэвида Иглмена, преобразование других поступающих сигналов в паттерны прикосновений может расширить наши чувства в новых сферах. В конце концов, все ощущения — это электрохимическая активность мозга, и не имеет значения, каким образом ее стимулируют.

Дэвид Иглмен демонстрирует жилет — универсальный экстрасенсорный датчик

В своей лаборатории ученый разработал систему, которая представляет собой универсальный экстрасенсорный датчик в виде жилета с несколькими десятками миниатюрных моторчиков. Этот датчик преобразует звуки в вибрацию, поступающую по спине и грудной клетке, позволяя людям с нарушениями слуха декодировать устную речь. В отличие от текста, набранного при помощи шрифта Брайля, звук не закодирован, а разбит на разные частоты.

Нет смысла ограничиваться только сенсорной системой. Иглмен и его коллеги хотят подключить жилеты к другим информационным потокам. Ученый уверен, что такие системы помогут создать совершенно новые ощущения. Другие живые существа видят в инфракрасном диапазоне или улавливают ультразвуковые частоты; чем же мы хуже них?

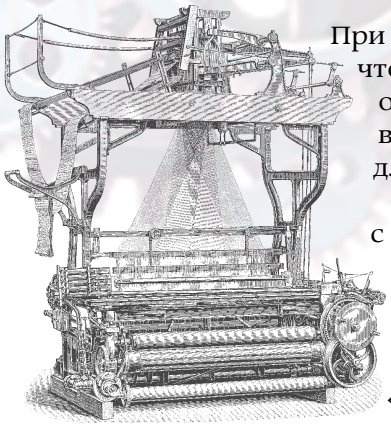
Нейронный жилет можно будет комфортно носить под скафандром

Для людей с необъятным желанием контролировать сложные системы придумали свои устройства, например, позволяющие игроку проникать в виртуальную реальность игры и получать информацию об игровой среде через прикосновения. В рамках одного из экспериментов жилет связали с потоком данных от беспилотного вертолета с дистанционным управлением, так что пилот мог чувствовать его движения и реагировать со скоростью, недоступной человеку, который просто наблюдает за транспортным средством с земли. По словам Иглмена, однажды астронавт сможет «почувствовать» состояние Международной космической станции вместо непрерывного слежения за консолями и показателями, а политик во время выступления сможет в реальном времени получать ответную реакцию от населения всего мира, поскольку жилет будет ретранслировать посты в *Twitter*.

На данный момент компания работает над широкоформатной версией жилета, общий принцип устройства которого звучит многообещающе. Отнеситесь к мозгу как универсальному вычислительному устройству, а затем решайте, какие новые входящие сигналы вы хотели бы испытать.

Так на что же похож наш мозг?

Философы любят предаваться размышлениям на темы вроде «Каково быть летучей мышью?». Не менее притягательна история ответов на вопрос «На что похож мозг?», сотканная из огромного количества ассоциаций.



При виде незнакомого нам предмета мы пытаемся понять, что он нам напоминает. Так мы поступаем со всем нашим опытом, и в данном случае с мозгом. На протяжении всех времен мозг оставался необычайно сложным объектом для изучения.

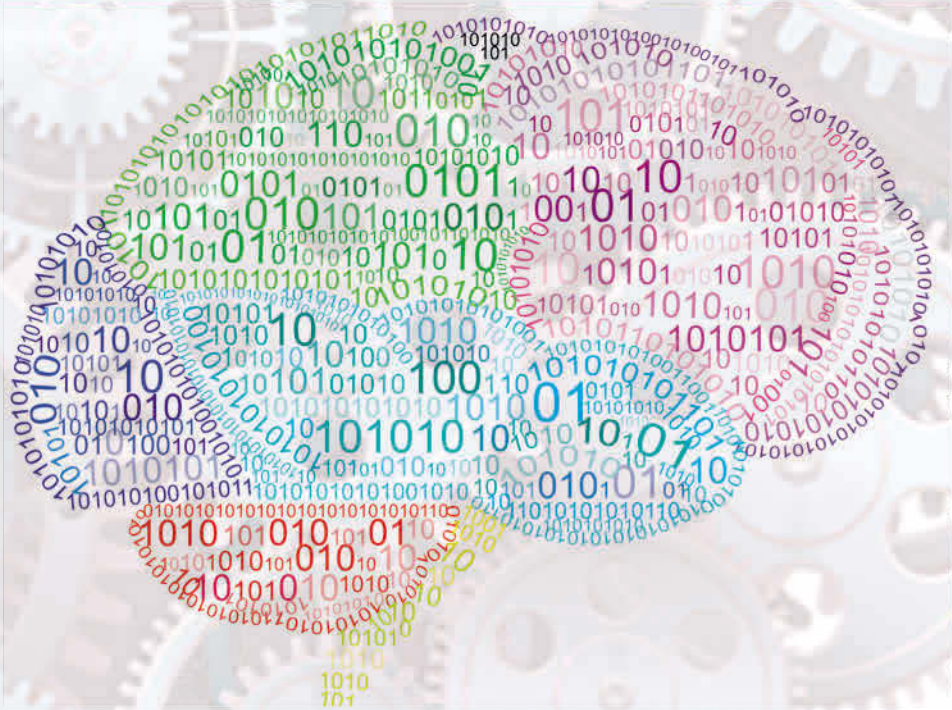
Рене Декарт, пораженный автоматическим устройством с гидравлической системой, построенным в XVII веке для короля Франции, предложил рассматривать тело человека как механико-гидравлическую модель. В XIX веке можно было услышать теорию о том, что мозг напоминает пианино, играющее мелодию «корковых вибраций». Индивидуальные клетки рассматривались как клавиши, небольшой набор компонентов, воспроизводящих бесконечное разнообразие музыки.

Позднее мозг сравнивали с системой железнодорожной коммуникации, первыми попытками автоматизации производства и даже (как вы до сих пор можете увидеть в потрепанных временем книгах) с телефонной станцией, не говоря уже о «заколдованном ткацком станке» Чарльза Скотта Шеррингтона, каждый раз образующем разные нейронные узоры.

Фактически воображение взывало к самым сложным изобретениям людей в попытках познать мозг. Особенно популярны сравнения с городами и их районами. Появление фотографии навело на мысль об изучении памяти; голографические снимки также внесли свою лепту. Нейронные функции сравнивают с электронными клапанами.

В последнее время все чаще проводится аналогия между мозгом человека и компьютером, однако мы можем привести достаточно признаков, отличающих мозг от нашей стандартной модели — цифровых компьютеров. Но это не так важно. Метафоры и аналогии помогают генерировать идеи для их дальнейшей апробации. Кроме того, компьютерные аналогии будут популярны до тех пор, пока на смену им не придет достойный кандидат. Вот о чем стоит задуматься нейробиологам будущего.

Между тем существует крайне удивительная научная работа, в которой рассмотрены области головного мозга, которые становятся активными, когда в ход вступают метафоры. Например, устойчивое выражение «бросить привычку» наводит на мысль о физическом броске или, по крайней мере, затрагивает двигательные зоны коры. Возможно, когда-нибудь наступит тот самый день, и мы изучим, как мозг обрабатывает метафоры, отражающие его активность.



16+

Научно-популярное издание

Серия «Все знания в одном томе»

Джон Тёрни

МОЗГ
Большая энциклопедия

Перевод с английского *Елизаветы Глебовой*

Заведующая редакцией *Юлия Данник*
Ответственный редактор *Вероника Суркова, Здешнев Павел*
Художественное оформление *Ольги Жуковой*
Компьютерная вёрстка *Анны Грених*
Технический редактор *Наталья Чернышева*
Корректор Полина *Дюжева, Надежда Панова*

Подписано в печать 05.05.2023. Формат 60x84/8.
Печать офсетная. Гарнитура Prospect. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 24.18
Тираж 2000 экз. Заказ № .

Общероссийский классификатор продукции ОК-034-2014 (КПЕС 2008);
58.11.1 — книги, брошюры печатные

Произведено в 2023 году в Российской Федерации.
Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»
129085, РФ, г. Москва, Звёздный бульвар, дом 21, строение 1,
Комната 705, пом. I, 7 этаж.
Электронный адрес: www.ast.ru
E-mail: ask@ast.ru

«Баспа Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме,
I жай, 7-қабат.
Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru
Интернет-магазин: www.book24.kz Интернет-дүкен: www.book24.kz
Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».
Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.
Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию
в республике Казахстан: ТОО «РДЦ-Алматы»
Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша
арыз-талаптарды қабылдаушының өкілі
«РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.
Тел.: 8 (727) 2 51 59 89,90,91,92; Факс: 8 (727) 251 58 12, вн. 107;
E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz
Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген. Өндірген мемлекет: Ресей

МОЗГ

Наш мозг — удивительный орган и единственный известный живой объект во Вселенной, способный задумываться о самом себе. Долгое время его изучение приводило лишь к домыслам и предположениям. Революционные неинвазивные технологии позволили заглянуть внутрь мозга и многое понять о его работе, но и сегодня порой кажется, что вопросов больше, чем ответов.

Эта книга подробно расскажет о том, что мы сегодня знаем о нашем самом главном органе, и поможет приоткрыть завесу тайны, окружающую его.

книги для любого настроения здесь

ИЗДАТЕЛЬСКАЯ ГРУППА АСТ

www.ast.ru | www.book24.ru

vk.com/izdatelstvoast

ok.ru/izdatelstvoast

ISBN 978-5-17-151199-9

9 785171 511999 >

ОГИЗ