

Скорость мысли

**Грандиозное
путешествие
сквозь мозг за
2,1 секунды**

**Марк
Хамфрис**

Марк Хамфрис

**Скорость мысли.
Грандиозное путешествие
сквозь мозг за 2,1 секунды**

«Individuum»

2021

УДК 612.82
ББК 28.7

Хамфрис М.

Скорость мысли. Грандиозное путешествие сквозь мозг
за 2,1 секунды / М. Хамфрис — «Individuum», 2021

ISBN 978-5-6046877-3-4

Вы оглядываете офис, замечаете последнее печенье в коробке на соседнем столе и берете его. Лишь две секунды, но в вашем мозгу происходят миллионы процессов. Всему причина – импульсы, именно с помощью них нейроны общаются между собой. За знакомым каждому из нас желанием съесть сладкого кроется захватывающее путешествие импульсов сквозь мозг – по мерцающей галактике нейронов и глубокой тьме коры головного мозга. Марк Хамфрис, нейробиолог и автор этой книги, исследует работу импульсов и пытается разобраться в самых любопытных вопросах науки о мозге. Как мы принимаем решения, управляем собственным телом и распознаем лица (и печенье)? Что науке вообще известно об импульсах? И сколько еще тайн в себе хранит наш мозг? Эта нейроодиссея позволит вам по-новому взглянуть на работу мозга и его удивительные возможности.

УДК 612.82

ББК 28.7

ISBN 978-5-6046877-3-4

© Хамфрис М., 2021
© Individuum, 2021

Содержание

Глава 1	6
Глава 2	15
Конец ознакомительного фрагмента.	26

Марк Хамфрис
Скорость мысли. Грандиозное
путешествие сквозь мозг за 2,1 секунды

Посвящается Нику, Эбби и Сету

Copyright © 2021 by Mark Humphries

© Алексей Снигиров, перевод, 2022

© ООО «Индивидуум Принт», 2022

Глава 1

Знакомство

Появление импульса

Послеобеденная часть рабочего дня – чертовски тяжелое время. На ваши ослабевшие циркадные ритмы накладывается груз переваривания опрометчиво съеденных на обед хот-дога и хумуса, затуманивая ваш разум и предательски подсовывая ему мысли о сладкой дремоте. Но через десять минут в конференц-зале должно начаться общее собрание, на котором вы рискуете заглушить своим храпом мотивационную речь генерального директора о том, что «расслабляться нельзя». «Съешь что-нибудь», – шепчет внутренний голос. На соседнем столе стоит коробка из-под домашнего имбирного печенья с кусочками груши и шоколада, которое принес Дитрих, чтобы скрасить утренний конференц-созвон с южноафриканским офисом, – на удивление вкусного, определенно соблазнительного, но, к сожалению, съеденного без остатка.

Нет, погодите-ка. Ваши глаза замечают округлый раскрошившийся краешек. Одно печенье осталось. Мозг пробуждается, вы начинаете оглядываться, чтобы определить диспозицию коллег, и возникает мысль: *могу ли я его взять?* После секундного колебания, взвесив эту этическую дилемму и, самое главное, убедившись, что никто не следит за вашими действиями, вы протягиваете руку.

В эти несколько мгновений ваш мозг гудит от электрических импульсов. Жизненно важных, тайнопеченьеориентированных электрических импульсов. Почему?

Ваш мозг использует электричество для передачи сообщений. Каждая нервная клетка, каждый из 86 миллиардов нейронов в вашем мозгу общается с другими нейронами, посылая крошечные скачки электрического напряжения – волны возбуждения – по тонким, как паутинки, кабелям аксонов. Мы, нейробиологи, называем эти электрические сигналы потенциалом действия, спайками или, как я буду их называть далее в этой книге, импульсами. Эти крошечные электрические импульсы бесконечно бегут через ваш мозг. Импульсы – это зрение, слух и осязание; мышление, планирование и действие. Импульсы – это язык, на котором нейроны разговаривают друг с другом. А общение нейронов – это любое наше действие.

Жизнь посредством импульсов

Все уникальные поступки, которые вы совершаете, возможны лишь благодаря обмену импульсами между нейронами в коре головного мозга (рис. 1.1).

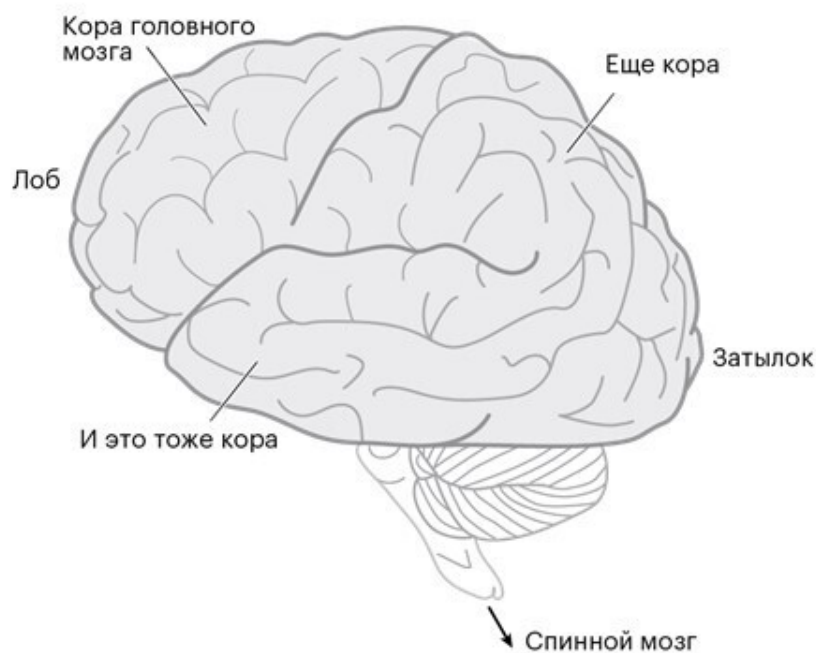


Рисунок 1.1. Базовая анатомия человеческого мозга. Большая часть внешнего слоя – это его кора.

Этот внешний слой человеческого мозга – кора, или кортекс – содержит больше нейронов, чем у любого другого животного ¹. Так много, что нам приходится делить его на совокупность областей, чтобы не запутаться. У каждой области есть свое название. (Большинство этих названий сложно назвать оригинальными: область, состоящая из нейронов, которые в основном взаимодействуют непосредственно со спинным мозгом и осуществляют наибольший контроль над движением, называется первичной моторной корой головного мозга; соседние области – это премоторная кора и, сюрприз, дополнительная моторная область. Захватывающе, правда?) Все эти области состоят из одних и тех же типов нейронов, но импульсы, которыми они обмениваются, вызывают совершенно разные действия.

Многие из этих областей заняты нашим зрительным восприятием: от зон, отвечающих за разбиение видимого мира на его простейшие компоненты – края, линии и углы, – до тех, что имеют дело с движением, цветами, объектами и лицами. Некоторые области контролируют слух и осязание; другие – наши движения.

Есть области, где сосредоточено управление действиями, уникальными для человеческих существ, – чтением, речью и ее восприятием. А в передней части коры мы находим области, которые творят что-то загадочное с информацией из внешнего мира, каким-то образом используя ее для планирования, прогноза и предсказания. И все это делают импульсы.

¹ [1] Все подсчеты количества нейронов взяты из книги *Herculano-Houzel S. The Human Advantage*. MIT Press, 2016.

Цифры головокружительные. Из 86 миллиардов нейронов в головном мозгу взрослого человека около 17 миллиардов – кортикальные, то есть находятся в коре. В среднем, каждый из них отправляет или получает как минимум один импульс в секунду ².

ООН подсчитала, что ожидаемая продолжительность жизни человека на этой планете сегодня составляет около 70 лет. Это больше двух миллиардов секунд, в каждую из которых в коре вашего головного мозга происходит около 17 миллиардов импульсов. В целом ваша жизнь состоит из примерно 34 миллиардов миллиардов ³ кортикальных импульсов.

Первый крик при появлении на свет. Первые неуверенные, робкие детские шаги. Боль, когда, внезапно взмахнув рукой, Сьюзан выбила тебе шатающийся молочный зуб в начальной школе. Осознание, что вот это зеленое пятно вдалеке – группа деревьев, и накатившее облегчение от уверенности в том, что теперь-то вы точно найдете обратный путь среди влажных от тумана холмов, обратно в желанное тепло так легкомысленно оставленной на обочине машины. Долго набираться храбрости, чтобы наконец сделать ей предложение, и вместо долго обдуманной изящной и остроумной фразы выпалить все в косноязычной спешке. Сгорать от стыда. Мысленно прыгать в эйфории от ее тихого «да». Решить, что вам пора что-то сделать с ужасным конфликтом между фиолетовым диваном и светло-зелеными шторами. Вспоминать запах свежее испеченного мамино хлеба и папиного барбекю. Держать на руках своего новорожденного ребенка. Читать это предложение. И это тоже.

Все это импульсы.

От величественного до самого банального, все, что вы сделаете за свою жизнь, – в тех 34 миллиардах миллиардов импульсов, возникающих в коре головного мозга. Если бы я попытался описать историю вашей жизни, используя всего по одному слову для каждого из них, ваша биография была бы длиннее, чем совокупный объем всех когда-либо опубликованных романов на английском языке ⁴. Да, абсолютно всех, с тех пор как Гутенберг изобрел печать книг наборным шрифтом в 1439 году. И длиннее значительно – в 76 миллионов раз. Даже с учетом совместных усилий Тома Вулфа, Нила Стивенсона и Джорджа Р. Р. Мартина по созданию книг, которые так удобно использовать в качестве гнета при засолке овощей, у романистов есть еще как минимум 380 миллионов лет или около того, чтобы опубликовать столько же слов на английском языке, сколько электрических импульсов возникает в коре головного мозга в течение вашей жизни. А ведь помимо нейронов коры головного мозга у вас есть миллиарды и миллиарды нейронов в других структурах нервной системы, посылающих еще миллиарды и миллиарды импульсов.

Надеюсь, вы меня извините, если я попытаюсь ограничиться описанием чего-нибудь менее грандиозного.

Путешествие импульса

В этой книге я собираюсь рассказать вам историю лишь о двух секундах из всех этих миллиардов. О простом действии: вы заметили последнее печенье в коробке, оставленной в

² [2] *Lennie P.* The cost of cortical computation // *Current Biology*. 2003. № 13. С. 493–497; *Laughlin S. B., Sejnowski T. J.* Communication in neuronal networks // *Science*. № 301. 2003. С. 1870–1874.

³ {1} Одним словом, квинтиллионов. – *Прим. ред.*

⁴ [3] Я оценил количество слов в 450 триллионов, учитывая, что общее количество опубликованных английских романов составляет около пяти миллионов (по Фреднеру), а среднее количество слов в одном романе – 90 000. Приблизительно 100 000 новых английских романов, появляющихся каждый год, были использованы для оценки необходимого для достижения паритета между словами и импульсами срока в 380 миллионов лет. См.: *Fredner E.* How many novels have been published in English? (An attempt) // 2017. 14 марта. URL: <https://litlab.stanford.edu/how-many-novels-have-been-published-in-english-an-attempt/>.

лотке для входящих документов, и подумали: *никто же не будет возражать, если я возьму его, правда?*

Путешествие импульса от чувствительных клеток глаза, на которые упал свет, отразившийся от печени, через отвечающую за зрение часть коры головного мозга, которая превращает узоры света и тени в очертания, отдельные крошки и цвет краешка последнего печенья в коробке, в те области коры, где происходит восприятие, узнавание и вспоминание, затем в область принятия решения, оттуда – погружение в глубины двигательной системы и наконец выход наружу, через спинной мозг и далее к мышцам, перемещающим вашу руку к тому, что видит ваш глаз. Путешествие от взгляда к решению и действию, из глаза в руку.

Это история обо всех местах, которые посетил импульс, и обо всем, что он «видел» на своем пути: о мерцающей галактике нейронов, глубокой тьме коры головного мозга, об одиноком нейроне. О расщеплениях на тысячу импульсов. О самопроизвольном зарождении и мгновенном исчезновении. Эпическое путешествие, совершенное за один миг; история, повторяющаяся два миллиарда раз.

Золотой век

За то, что я могу рассказать вам эту историю, нужно благодарить замечательное сочетание современных технологий.

Одна из них – нейровизуализация, то есть получение изображений головного мозга, в особенности с помощью функциональной магнитно-резонансной томографии (фМРТ), основного источника данных для научно-популярных рассказов о работе мозга. фМРТ способна многое рассказать нам об общей картине того, как группа областей мозга может обрабатывать зрительные сигналы, но не слуховую информацию; об эмоциональной реакции на лица, но не на шоколад; или, как это ни парадоксально, какие отделы активируются только тогда, когда ваш разум кажется пустым. И все же фМРТ ничего не сможет сказать нам о том, как работают нейроны. Каждый крошечный пиксель компьютерной картинки на экране томографа, каждая цветная точка содержит 100 000 нейронов. Томограф регистрирует интенсивность потока обогащенной кислородом крови, циркулирующей вокруг этих 100 000 нейронов, – потока, который увеличивается по мере того, как они начинают отправлять все больше импульсов, поскольку для генерации импульсов требуется энергия, а для выработки этой энергии необходим кислород. Каждая цветная точка на томограмме дает нам только информацию о том, где вокруг очередной группы из 100 000 нейронов изменилась потребность в крови, источнике энергии. Таким образом, фМРТ не позволяет разглядеть или записать состояние отдельных нейронов, не говоря уже об импульсах, которые они посылают.

Эта замечательная технология – единственный способ заглянуть в текущую активность живого человеческого разума без физического вторжения в мозг, к тому же она обладает большим потенциалом как оружие в нашей битве с неврологическими расстройствами. Ее применение для диагностики и лечения, возможно, важнее нашего желания досконально разобраться, что делает каждый конкретный нейрон. Тем не менее одна лишь эта технология нам здесь не поможет. Пытаться понять, как работают нейроны, с помощью фМРТ – все равно что следить за ходом футбольного матча, стоя на улице и слушая рев толпы на стадионе. Радостные крики, трагические стоны и презрительный свист подскажут вам, когда на поле произойдет что-то захватывающее, и, если повезет, по тому, какая часть зрителей реагирует, вы сможете примерно определить, на каком конце поля разворачивается действие. Но вы не сможете восстановить сам ход матча, определить, что делали игроки и где находился мяч в течение этих девяноста минут. Чтобы понять матч, нам нужно наблюдать за игроками. Чтобы понять мозг, нужно наблюдать за импульсами.

Впервые импульс от одного нейрона удалось мельком разглядеть в 1920-х годах ⁵. С тех пор десятки тысяч нейробиологов занимались регистрацией импульсов, исходящих от всех мыслимых частей мозга. И это относится к мозгу почти любого живого существа, от гигантских нейронов в щупальцах кальмара до нейронов крысы, отвечающих за принятие решений. Мы можем даже регистрировать активность нейронов бодрствующего, болтающего, находящегося в ясном уме человека. Но, поскольку мы живем в самый разгар золотого века системной нейробиологии, теперь можно отважиться пойти дальше в наших попытках понять, как именно нейроны связываются друг с другом и работают сообща.

На протяжении десятилетий мы были способны регистрировать импульсы только одного нейрона за раз. Теперь мы можем одновременно регистрировать импульсы сотен и даже тысяч нейронов с помощью стандартного оборудования, и возможности этих передовых технологий растут экспоненциально из года в год ⁶.

Раньше мы лишь примерно могли определить те зоны, где нейроны одной области мозга через свои электрические кабели-аксоны осуществляли соединение с другими областями. Теперь мы можем проследить «провод» от каждого отдельного нейрона, чтобы точно определить, куда он будет отправлять свои импульсы.

У нас появилась возможность регистрировать не только те электрические импульсы, которые посылает нейрон, но и эффект, который эти импульсы оказывают на принимающий нейрон, через крошечное синаптическое соединение – размером оно меньше, чем бактерия. Мы даже можем делать это одновременно в нескольких точках одного нейрона.

И теперь мы научились не просто регистрировать импульсы, но даже включать и выключать нейроны светом, заставляя их посылать импульсы по нашей команде либо вообще запрещая им это делать ⁷. Наконец, мы можем напрямую проверить, что стоит за активностью конкретных нейронов, посмотрев, что происходит, когда они отправляют или, что не менее важно, не отправляют свои импульсы.

Высокотехнологические инструменты позволяют нам регистрировать индивидуальные импульсы, посылаемые сотнями отдельных нейронов, по желанию вызывать или блокировать отправку и получать некоторое представление о местах назначения той «проводки», по которой они движутся. И все вместе они рассказывают о путешествиях импульсов.

Есть, правда, одна серьезная проблема с этим шведским столом технологических триумфов. Ни один из них нельзя использовать на живом человеке. Для отслеживания связей между вашими нейронами нужно ввести флуоресцентное химическое вещество непосредственно в конкретную область живого мозга, затем извлечь этот мозг, разрезать его на тонкие пластины и поместить срезы под микроскоп, чтобы выяснить, где в конечном итоге оказалось флуоресцентное вещество. Естественно, с вами ничего подобного делать нельзя. Чтобы включать и

⁵ [4] Одни из первых сообщений о регистрации отдельных импульсов см. *Adrian E. D.* The impulses produced by sensory nerve endings: Part I // *Journal of Physiology*. 1926. № 61. С. 49–72.

⁶ [5] Это нейробиологический эквивалент закона Мура: технология регистрации импульсов от отдельных нейронов с течением времени экспоненциально увеличивает количество нейронов, сигналы которых она может раздельно и одновременно записывать, удваивая их число примерно каждые 6,3 года. Мы могли бы назвать это «законом Стивенсона»: *Stevenson I., Kording K.* How advances in neural recording affect data analysis // *Nature Neuroscience*. 2011. № 14. С. 139–142; и веб-сайт Яна Стивенсона: <https://stevenson.lab.uconn.edu/scaling/>.

⁷ [6] Включение и выключение нейронов светом стало возможно с помощью технологий оптогенетики, впервые примененной к клеткам млекопитающих в 2005 году. У некоторых бактерий есть специальные ионные каналы – опсины – в клеточной стенке-мембране, которые открываются, когда на них падает свет. Путем генной инженерии осуществляют экспрессию – введение – генов этих ионных каналов в нейрон. После такой модификации мы можем заставить этот нейрон так же открывать ионные каналы в мембране под воздействием света. Направляя свет на такой нейрон, мы инициируем открытие канала, ионы устремляются внутрь или наружу из клетки (в зависимости от того, какой тип ионного канала кодируется генами), либо возбуждая этот нейрон, либо подавляя его. Таким образом можно управлять одновременно тысячами нейронов или определенными типами нейронов. Подробнее см. *Miesenböck G.* The optogenetic catechism // *Science*. 2009. № 326. С. 395–399; *Deisseroth K.* Optogenetics: 10 years of microbial opsins in neuroscience // *Nature Neuroscience*. 2015. № 18. С. 1213–1225.

выключать нейроны, мы сначала должны сделать их чувствительными к свету, вставив участки ДНК светочувствительных растений или бактерий в ДНК нейрона. Это с вами проделать тоже не получится. А для записи импульсов от сотен нейронов одновременно нужно либо заполнить ваши нейроны токсичным химическим веществом, которое испускает свет при электрической активности, либо вставить в них через отверстие в черепе множество тончайших игл-электродов из вольфрама или углеродного волокна, прикрепленных к толстому пучку длинных проводов. С этической точки зрения такие действия, как нарезка мозга на тонкие пластины, манипуляция с генами или протыкание живого человека электродами, отпадают.

Но бывают удивительные исключения. В очень редких случаях нам удается регистрировать электрическую активность от электродов, имплантированных непосредственно в живой человеческий мозг. Например, у пациентов с болезнью Паркинсона, перенесших нейрохирургическую операцию по глубокой стимуляции мозга. Этот метод лечения заключается в электро-стимуляции глубоких структур в головном мозгу (отсюда и название «глубокая стимуляция головного мозга», неврологи – одни из самых буквальных людей на планете). В мозг пациента вживляют электрод, соединенный с электронным генератором импульсов, питающимся от батарейки, который обычно имплантируют под ключицу. Операция по имплантации электрода проходит в два этапа. Сначала электрод устанавливается примерно в нужное место, но не закрепляется, и его выводы оставляют свободными для подключения снаружи, так что положение можно точно настроить. Во время настройки невролог будет стимулировать мозг по этим проводам. Если электрод находится немного не в том месте, то будет происходить немного не то, что требуется: если пациент вскинет руку, электрод расположен неправильно, надо чуть подвинуть; если пациент начинает бесконтрольно плакать – тоже неправильно, нужна корректировка. Если же трясущаяся рука пациента внезапно замирает, значит, правильное положение найдено; теперь электрод можно закрепить на месте и перейти ко второму этапу операции – вживлению под кожу проводов к электронному блоку и закрытию отверстия в черепе.

Но необходимость этого медленного процесса точной настройки означает, что у исследователей есть промежуток времени, около недели, в течение которого провода, свисающие из черепа пациента, можно использовать не только для подачи, но и для записи сигналов, регистрации активности нейронов, расположенных рядом с электродами⁸. Изобретательные исследователи проводят эту неделю, предлагая пациенту выполнить целый ряд задач, которые, как они надеются, неким образом затронут крошечные области в глубоких структурах мозга. Аналогично, пациенты с тяжелыми формами эпилепсии, не поддающейся медикаментозному воздействию, тоже могут решиться на операцию по имплантации электродов, предназначенных для стимуляции небольшой области мозга, обычно в гиппокампе или в коре головного мозга, где начинается нежелательная судорожная активность. Опять же, занимаясь тонкой настройкой положения электродов у таких больных, исследователи имеют возможность записывать данные об активности нейронов, расположенных рядом с этими электродами, во время выполнения пациентами их заданий⁹. В обоих случаях мы получаем редкую возможность произвести запись активности одиночных нейронов головного мозга живого человека. Это ценный исследовательский ресурс, но он ограничен единичными областями мозга у небольшого количества людей, – резать мозг и манипулировать генами все равно не получится.

⁸ [7] Примеры регистрации активности нейронов, записанной с электродов глубокой стимуляции мозга, см. *Reese R., Leblois A., Steigerwald F.* и др. Subthalamic deep brain stimulation increases pallidal firing rate and regularity // *Experimental Neurology*. 2011. № 229. С. 517–521; *Singh A., Mewes K., Gross R. E. и др.* Human striatal recordings reveal abnormal discharge of projection neurons in Parkinson's disease // *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*. 2016. № 113. С. 9629–9634.

⁹ [8] Примеры записи электрической активности от электродов, имплантированных в живой мозг для обнаружения очагов эпилептических припадков у людей, см. *Ison M. J., Quiroga R. Q., Fried I.* Rapid encoding of new memories by individual neurons in the human brain // *Neuron*. 2015. № 87. С. 220–230.

Итак, поскольку людей мы с повестки снимаем, нейробиологи, исследующие импульсы, значительную часть данных получают в исследованиях на широком круге других живых организмов. Некоторых используют для опытов, потому что с точки зрения эволюции они являются нашими близкими родственниками – это относится, в частности, к крысам и мышам с их уникальным сочетанием сообразительности и хорошо изученной ДНК. Других исследуют на предмет уникальной возможности изучения основ взаимодействия нейронов друг с другом. Саламандры, аквариумные рыбки данио-рерио, пиявки, аплизии¹⁰ и даже личинки дрозофил – все они появятся на следующих страницах моей книги. Ведь несмотря на колоссальную разницу между слизнем и человеком, строение и принципы действия нейронов, как ни странно, за миллионы лет эволюции почти не изменились. Нейрон остается узнаваемой клеткой практически во всех существах, обладающих хоть каким-нибудь мозгом. Если организм видим и движется – его жизнь состоит из импульсов.

Как нам понять импульсы

Интерпретируя массивы данных, полученных из опытов на животных, об импульсах и о том, куда и когда их отправляют нейроны, мы основываемся на том, что известно о человеческом мозге. Нейровизуализация подтверждает, что аналогичные области человеческого мозга в ответ на аналогичные раздражители из внешнего мира будут в аналогичное время и в аналогичных местах проявлять одинаковую активность, т. е. посылать такие же импульсы, как и те, что мы фиксируем у животных. А психология и когнитивные науки позволяют нам понять, какие процессы происходят в человеческом разуме, когда мы наблюдаем эти импульсы у других существ.

Исследования распознавания лиц – прекрасный пример взаимодействия между психологией, средствами нейровизуализации и импульсами. Люди уделяют много внимания лицам. Психологи утверждают, что с самого раннего детства мы предпочитаем смотреть именно на лица людей. Повзрослев, мы становимся способны хранить в памяти около пяти тысяч лиц¹¹ и можем распознавать изображения лиц по крайне скудной визуальной информации, бросив на них лишь беглый взгляд и глядя с самого необычайного разнообразия ракурсов – мы видим их даже при использовании самых простых визуальных символов. Для нас лицом является даже это::-о. Или это:;-). Наша способность видеть лица, пожалуй, не должна вызывать удивления, если учесть, что распознавание лиц и их выражений лежит в основе многих социальных взаимодействий и требуется для определения, кто является близким нам по роду или племени, а кто нет, кто в иерархии выше нас, а кто ниже, кто рад встрече с нами, а кому она на самом деле неприятна. Однако глубина подхода к этой задаче подразумевает, что наш мозг должен выделять серьезные вычислительные мощности для распознавания лиц.

Функциональная визуализация показала нам, что человеческий мозг действительно серьезно относится к этой проблеме – настолько серьезно, что в нем выделена целая область, предназначенная только для распознавания лиц. Часть веретенообразной извилины (также известной как боковая затылочно-височная извилина или fusiform face area, FFA), всегда демонстрирует активность, если человеку показывают лицо, под каким бы странным углом оно ни находилось, но остается в покое при показе других объектов или искаженных до неузнаваемости изображений лиц. Она действительно озабочена только лицами¹².

¹⁰ {2} Аплизии (или морские зайцы) – род брюхоногих моллюсков. – *Прим. ред.*

¹¹ [9] Jenkins R., Dowsett A. J., Burton A. M. How many faces do people know? // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2018. № 285. URL: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rspb.2018.1319>.

¹² [10] Kanwisher N., McDermott J., Chun M. M. The fusiform face area: A module in human extrastriate cortex specialized for face perception // *Journal of Neuroscience*. 1997. № 17. С. 4302–4311.

Затем Дорис Цао, Винрих Фрейвальд и их коллеги решили поработать с обезьянами – животными, которым тоже небезразличны лица сородичей, – чтобы проникнуть в эту область их мозга, зарегистрировать импульсы и определить, какие же сигналы фактически посылают друг другу нейроны¹³. Они обнаружили, что в мозгу их подопытных действительно существует конкретная область нейронов, отправляющих сигналы в ответ на изображения лиц¹⁴. Оказалось, что в этой области существует шесть отдельных участков нейронов, занятых распознаванием лиц, и они связаны друг с другом. Стимуляция одного участка активировала нейроны в некоторых других¹⁵, то есть вполне вероятно, что узнавание лица было представлено определенными паттернами (или, как их называли, кодами) лицевой идентификации – совместной активности нейронов в отдельных участках. Этот код совместной активности был обнаружен через девять лет, в 2017 году: каждый нейрон посылает импульсы в ответ на некую абстрактную особенность, характерную для изображения лица, например на кривую, образованную бровью и носом. Комбинация нейронов, реагирующих на различные абстрактные характеристики, свойственные лицам, и совместно отправляющих импульсы, в сумме составляет группу распознавания лица¹⁶.

Итак, психология объясняет, насколько важны для людей лица и как тщательно они их рассматривают и изучают. Нейровизуализация мозга позволяет нам обнаружить активность области мозга, предназначенной для обработки изображений лиц. Регистрация импульсов дает возможность увидеть, как выглядит код лицевой идентификации и то, как нейроны этого региона отправляют свои сообщения об узнавании лиц. Сама по себе запись электрической активности в ответ на предъявление животному изображения лица его сородича не говорит нам о том, что эта активность соответствует «узнаванию» лиц, поскольку «узнавание» – это описание субъективного человеческого опыта. Через собственный опыт мы интерпретируем импульсы и в мозгу животного.

Куда мы двинемся дальше

Золотой век передовых технологий позволил нам лишь слегка приоткрыть краешек занавеса на той сцене, где мозг разыгрывает свои нейронные драмы. Иногда кажется, что в последние десять лет каждый день приносил новости об очередных исследованиях, переворачивающих наше представление о том, как нейроны взаимодействуют друг с другом. И каждый раз приходилось вносить коррективы в понимание механизма функционирования нашего мозга – того, как мы различаем объекты, как принимаем решения, как совершаем движения. Но каждая отдельная группа нейробиологов, лихорадочно копающаяся в своей любимой области мозга или увлеченно препарирующая отдельный тип нейронов, может не видеть общей картины, не успевая отслеживать открытия, радикально изменяющие наше понимание внутренней работы мозга. Я же попробую принять этот вызов.

Будучи вашим проводником в путешествии вместе с импульсом из глаза в руку, эта книга расскажет, что мы уже знаем об импульсах, что они значат для нас, людей, и в чем нам еще только предстоит разобраться. Это путешествие позволит нам опровергнуть некоторые ошибочные представления и о том, как работает мозг, и о его несовершенствах, многие из которых свойственны самим нейробиологам.

¹³ [11] Замечательный отчет о работе Дорис Цао, в том числе взаимосвязь ее исследований с другими работами по расшифровке кодов идентификации лиц, см. *Abbott A. The face detective // Nature. 2018. № 564. С. 176–79.*

¹⁴ [12] *Tsao D. Y., Freiwald W. A., Tootell R. B. H. u др. A cortical region consisting entirely of face-selective cells // Science. 2006. № 311. С. 670–674.*

¹⁵ [13] *Moeller S., Freiwald W. A., Tsao D. Y. Patches with links: A unified system for processing faces in the macaque temporal lobe // Science. 2008. № 320. С. 1355–1359.*

¹⁶ [14] *Chang L., Tsao D. Y. The code for facial identity in the primate brain // Cell. 2017. № 169. С. 1013–1028.*

Эталонный нейрон из учебника наделен конкретной функцией – он посылает определенные импульсы в ответ на определенные внешние воздействия. Но мы встретим и темные, «немые» нейроны – большие группы в буквальном смысле безмолвных клеток, безучастных ко всему, что происходит вокруг. Они невидимы для нейровизуализации – словно темная материя во Вселенной – и бросают вызов нашим самым глубоко укоренившимся теориям о том, как должны работать нейроны. Эволюция не терпит бесполезного, так почему же она допускает существование миллиардов нейронов, которые, кажется, бездействуют?

Еще мы встретим спонтанные импульсы. Импульсы, которые таинственным образом генерируются нейронами без какого-либо воздействия из внешнего мира; они появляются исключительно из-за бесчисленных петель обратной связи между нейронами, которые заставляют их бесконечно возбуждать друг друга. Они не содержат ни реакции на послание из внешнего мира, ни воздействия на этот мир через движение. Но еще невероятнее импульсы, спонтанно возникающие даже без какого-либо сигнала, поступающего в нейрон, исключительно благодаря циклическим реакциям молекул внутри него. И все же, следуя по нашему маршруту от взгляда к движению, мы неоднократно и повсюду будем встречать подобные импульсы.

Встреча со спонтанными импульсами ведет к возникновению одной из новых идей, которые я изложу далее в этой книге: спонтанные импульсы являются неизбежным следствием колоссального объема электрических соединений между огромным количеством нейронов, составляющих мозг, и эволюция приспособила их для нашего выживания. Вместо того чтобы ждать, пока импульсы, несущие сигналы воздействия из внешнего мира, пройдут через мириады областей коры головного мозга, вначале распознающие, что именно увидел глаз, затем решающие, что с этим делать, а затем передающие команды действовать, – вместо того чтобы ждать окончания всего этого процесса, мы используем спонтанные импульсы, которые наделяют нас силой предвидения. Спонтанные импульсы предсказывают, что мы увидим, что услышим, каким будет наше следующее решение. Они заранее готовят нас к совершению следующих движений. Все для того, чтобы мы могли быстрее реагировать – то есть выжить и дольше прожить.

Следуя за импульсом, который путешествует из зрительной клетки вашего глаза через мозг к мышцам вашей руки, – от мелькнувшего краешка печенья через его распознавание, принятие решения схватить его, движение и вплоть до достижения результата. Мы вместе с ним преодолеем этот тяжелый путь, будем вместе страдать, клонироваться на множество других импульсов, терпеть неудачу за неудачей и двигаться дальше. Мы будем блуждать по великолепию богато укомплектованной префронтальной коры и в ужасе стоять перед стеной электрического шума, исходящей от базальных ганглиев. Но все это еще впереди. Начнем мы с того, что пока понимаем лучше всего, – самого импульса.

Глава 2 Всё или ничего

Двоичный код

В начале 1940-х Уоррен Маккаллок сделал одно неожиданно смелое, казалось бы, ничем не подкрепленное предположение. Это был акт творческой отваги, на которую способен лишь человек, причудливо совместивший профессии психиатра, нейробиолога и философа¹⁷. Первые нечеткие изображения мозговых импульсов исследователи начали получать в конце 1920-х – начале 1930-х годов. Колебания линии на экране осциллографа¹⁸, показывающие наличие электрических пульсаций, были настолько слабыми, что пропадали даже от звука кашля в соседней комнате. И все же Маккаллок был заморожен тем, что импульсы от одного и того же нейрона каждый раз выглядели примерно одинаково – одной формы и одной амплитуды. Располагая всего несколькими примерами записей электрической активности нервных клеток, он выдвинул гипотезу: активность любого нейрона в любой области мозга происходит по принципу «все или ничего»; либо он посылает импульс, имеющий заданную форму и амплитуду, либо его активность вовсе не расценивается как сигнал.

Десятилетия работы показали, что Маккаллок был прав. В этой главе, базируясь на его вдохновенном предположении, мы попробуем ответить на экзистенциальный вопрос: почему именно импульсы?

Гипотеза Маккаллока оказалась верна благодаря тому, каким образом нейроны генерируют импульсы. Как и любая клетка, нейрон обладает мембраной, «кожей», которая окружает содержимое, удерживая его внутри. Мембрана нейрона изолирует ионы, находящиеся внутри клетки, от ионов снаружи, в межклеточной жидкости. А разница между суммами зарядов ионов, находящихся внутри и снаружи нейрона, означает, что между ними есть электрический потенциал – крошечное напряжение, величина которого постоянно колеблется.

Когда разность потенциалов между телом нейрона и окружающей средой достигает критической величины, запускается стремительный лавинообразный процесс. В мембране начинают открываться и закрываться ионные каналы, через которые ионы могут проходить с внутренней стороны мембраны на наружную и наоборот, смещая потенциалы и создавая электрический импульс, который распространяется и за пределы самого тела нейрона. Рождается потенциал действия – импульс, который, как по кабелю, стремительно пробегает по отростку-аксону, соединяющему нейроны (см. рис. 2.1).

¹⁷ [1] Уоррен Маккаллок – пионер системной и вычислительной нейробиологии, [соратник отца кибернетики Норберта Винера]. Замечательный биографический очерк о нем написал Майкл Арbib, который знал Маккаллока в последние годы его жизни. Более полную биографию, позволяющую оценить его работу в контексте времени, можно найти у Тары Абрахам. *Arbib M. A., Warren McCulloch's search for the logic of the nervous system // Perspectives in Biology and Medicine. 2000. № 43. С. 193–216. Abraham T. H. Rebel Genius: Warren S. McCulloch's Transdisciplinary Life in Science. MIT Press, 2016.*

¹⁸ [2] Если нейробиологам везло и у них был доступ к таким приборам. Осциллографы [с электронно-лучевыми трубками] появились в широком обиходе ближе к 1930-м годам, поэтому самые ранние изображения мозговых импульсов, полученные, например, Эдгаром Эдрианом, сделаны с помощью самодельных приспособлений из часовых механизмов, пружин, проводов и катушек для преобразования этих крохотных скачков напряжения в движения пера на подвижной ленте.

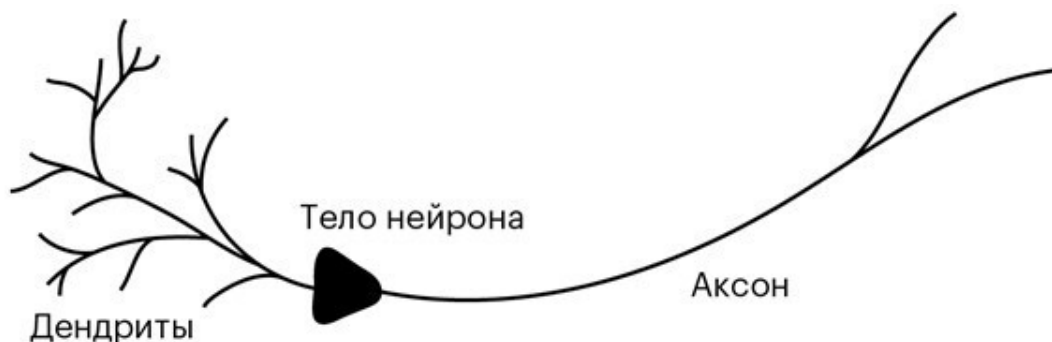


Рисунок 2.1. Основные части нейрона. Импульсы образуются в теле нейрона и распространяются по его отростку-аксону – «кабелю», соединенному через синаптические промежутки с дендритами соседних нейронов, древообразными структурами отростков, которые принимают импульсы-сообщения от аксонов.

Процесс возникновения каналов в мембране всегда протекает одинаково, поэтому электрический импульс всегда получается одинаковой продолжительности и амплитуды. Либо импульс есть, либо его нет, никаких компромиссов.

Путь к пониманию универсальной природы нервных импульсов начался с исследований легко доступных нервных окончаний у неприхотливых лабораторных животных: седалищного нерва лягушки, глаза мечехвоста и глаза угря¹⁹. Импульсы, регистрировавшиеся в этих экспериментах, каждый раз оказывались одной и той же формы. Однако потребовалось более двух десятилетий кропотливой работы, чтобы, начав с анализа этих первых записей, сделанных в первой половине 1930-х годов, и ставя эксперименты на других животных, найти ответ на вопрос, почему так происходит. Кульминацией стала модель, разработанная Аланом Ллойдом Ходжкином и Эндрю Хаксли в 1952 году, в которой они собрали все доступные данные²⁰.

Ходжкин и Хаксли работали с гигантским аксоном кальмара (речь, конечно, об аксоне, который является гигантским у обычного кальмара, а не об аксоне гигантского кальмара, обитающего в глубинах океана, – разместить такого левиафана в обычной лаборатории было бы довольно непросто). Его огромный по клеточным меркам диаметр²¹ стал настоящим подарком для ученых, которым удалось ввести электрод прямо внутрь аксона и напрямую зарегистрировать импульс, перемещающийся по нему. А еще экспериментаторы научились выдавливать из аксона цитоплазму и заменять ее на солевые растворы разного состава. Их идея заключалась в том, чтобы затем поиграть с ионами в жидкости, в которой находился нейрон, увеличивая или уменьшая концентрацию определенных типов ионов, чтобы выяснить, какие именно ионные токи участвуют в проведении нервного импульса.

Дело в том, что живые нейроны находятся в соленой среде – за пределами мембраны, в межклеточной жидкости, много ионов натрия (с положительным зарядом, +) и ионов хлора (с отрицательным зарядом, —). Однако в покое внутри нейрона, в его цитоплазме, ионов натрия и хлора мало, но много ионов калия (тоже положительно заряженных, +). Поскольку концен-

¹⁹ [3] Интересные описания исследований нервных импульсов, от Гальвани и вплоть до работ Ходжкина и Хаксли в 1950-х годах, см. в книге *McComas A. J., Galvani's Spark: The Story of the Nerve Impulse.* Oxford University Press, 2011.

²⁰ {1} В 1963 году они получили Нобелевскую премию в области физиологии и медицины за свою модель для описания электрических механизмов, которые обуславливают генерацию и передачу нервного сигнала. – *Прим. ред.*

²¹ {2} Кальмары передвигаются реактивным способом, выбрасывая воду из внутренней полости. Резкое сокращение мышц позволяет им совершать «прыжки» с большой скоростью на короткие расстояния. Управление этими мышцами осуществляется как раз при помощи нейронов с гигантскими аксонами – диаметром до 1 мм (типичный диаметр аксона у млекопитающих в сотни раз меньше – около 2 мкм). Толщина гигантского аксона кальмара увеличивает скорость проведения нервного импульса: чем больше площадь поперечного сечения аксона, тем меньше его сопротивление. – *Прим. пер.*

трации заряженных ионов – особенно калия – различаются по обе стороны мембраны, это создает на ней электрический потенциал, называемый потенциалом покоя. Изменяя концентрации ионов в жидкости, окружающей нейрон, Ходжкин и Хаксли управляли величиной этого потенциала. И, что очень важно, смогли выяснить, какие типы ионов (натрия, калия или хлора) определяют каждую фазу формирования импульса.

Мучая аксон кальмара в ванночке с соленой водой, ученые открыли процесс рождения импульса (рис. 2.2). Когда потенциал на мембране нейрона превышает критическое значение, в ней лавинообразно открываются ионные каналы, через которые могут проходить только ионы натрия. Они устремляются внутрь клетки, быстро увеличивая там свою концентрацию и вызывая всплеск напряжения на мембране. Но это продолжается недолго, поскольку повышение концентрации ионов натрия вызывает открытие других каналов, пропускающих ионы калия, которые перекачиваются наружу, отправляя положительный заряд обратно почти так же быстро, как он поступает внутрь с ионами натрия. В свою очередь этот выброс калия закрывает каналы для натрия, поток ионов прекращается, и так же быстро, как оно росло, напряжение снова падает до отрицательных значений. Этот быстрый рост, а затем резкое падение напряжения и есть импульс.



Рисунок 2.2. Импульс. Электрический потенциал (толстая черная линия) на мембране нейрона нарастает, пока не достигнет критической точки. Это запускает лавинообразное открытие каналов в мембране, ионы устремляются внутрь и затем наружу, потенциал быстро повышается, а затем так же стремительно снова падает вниз, прежде чем вернуться к нормальному состоянию. Весь процесс занимает около миллисекунды.

Это были не просто любопытные эксперименты, а железная закономерность – модель Ходжкина – Хаксли. Это математическое описание процесса электрического возбуждения, открытия и закрытия каналов в мембране клетки – то есть какие каналы открываются, в зависимости от чего и на какое время – они выразили системой уравнений. Она применима практически ко всем нейронам – по достижении порогового значения в них каждый раз происходят одни и те же процессы ²². Какие-то детали, например количество натриевых или калиевых

²² [4] Использование термина «критический потенциал» здесь не случайно. Читатели, знакомые с основами нейробиологии, могут задать вопрос, почему я не употребляю термин «порог», как в учебниках, где обычно говорится: «...когда потенциал достигает порога, возникает импульс». Однако я делаю так потому, что «порога» в смысле точного значения напря-

каналов на единицу площади мембраны или скорость, с которой эти каналы открываются и закрываются, могут различаться для разных типов нейронов. Поэтому импульс в гигантском аксоне кальмара может иметь форму, отличную от импульса, сгенерированного нейроном в гиппокампе лабораторной мыши. Но независимо от несущественных различий это импульсы, и действуют они одинаково.

Благодаря своей смелой догадке о том, что нейроны при любых обстоятельствах обмениваются электрическими импульсами по принципу «все или ничего», Маккаллоу понял, что мы можем радикально упростить процесс изучения мозга. Вместо того чтобы беспокоиться о деталях формы импульса, его длительности или амплитуде, нам нужно только знать, был ли он отправлен. То есть импульс означает «1», а отсутствие импульса означает «0». Получается, все сообщения нейронов выражаются в двоичном коде.

Двоичный код подразумевает двоичную логику. Маккаллоу догадался об этом, а дальше дело застопорилось. Но счастливый случай свел его с Уолтером Питтсом – вундеркиндом и обладателем совершенно потустороннего гения²³. Однажды он прочитал за три дня классический трехтомник «Принципы математики» и нашел в нем несколько спорных моментов, о чем и написал одному из авторов – знаменитому математику и философу Бертррану Расселу. Рассел ответил Питтсу и предложил ему поступить в аспирантуру в Великобритании. Через два года он сбежал из дома, чтобы поступить в Университет Чикаго. Он нанимался на разные временные работы и тайком пробирался на лекции по математике и логике (если вам кажется, что это звучит на удивление схоже с сюжетом «Умницы Уилла Хантинга», вы не одиноки). Друг Питтса, Джерри Летвин, оказался знаком с Уорреном Маккаллоу – и случайно узнал, что тому нужна помощь с математикой. Помощь неуклюжего высоколблого гения-логика не от мира сего.

В совместной работе Маккаллоу и Питтс, опираясь на двоичную природу сигналов в нервных клетках, доказали, что группа нейронов, получающих друг от друга единицы или нули и отправляющих импульсы в зависимости от сочетания полученных на входе данных, позволяет построить любой элемент, необходимый для решения задач дискретной логики. Например, для вычисления логического «И» достаточно пары нейронов: оба отправляют импульс – то есть «1», – только если оба одновременно получили импульс на входе, и ни один из них не отправляет ничего – то есть «0» – при любой другой комбинации на своих входах. Другая пара может вычислять исключающее «ИЛИ», если каждый отправляет импульс («1»), когда хотя бы один нейрон получил входящий импульс, но не отправляет импульса («0»), если оба нейрона не получали входных данных или получили по импульсу одновременно. Маккаллоу и Питтс показали, что путем добавления подобных простых нейронов можно построить вычислитель, реализующий любые мыслимые логические операции, какими бы сложными они ни были. А все, что может производить логические операции, является вычислителем. Так что, по-видимому, ответ на вопрос «Почему именно импульсы?» таков: чтобы мозг мог работать как вычислитель.

жения, при котором произойдет генерация импульса, не существует. Напряжение, при котором нейрон сгенерирует импульс (или «потенциал действия», «спайк», как официально называется волна возбуждения, перемещающаяся по мембране живой клетки. – *Прим. пер.*), зависит от того, что перед этим происходило с нейроном, и, что наиболее важно, от того, как давно он сгенерировал последний импульс. Таким образом, всегда существует такое напряжение – критический потенциал, – при котором возникнет импульс. Но величина этого напряжения не всегда будет одной и той же – то есть порога не существует. С объяснением – длиной в книгу – о том, почему для нейрона не существует пороговых значений, можно ознакомиться в сложной, но крайне интересной работе Евгения Ижикевича: *Ижикевич Е. Динамические системы в нейронауке. Геометрия возбудимости и пачечной активности. Институт компьютерных исследований, 2018. Чтобы узнать, насколько изменчив может быть критический потенциал см., например: Platkiewicz J., Brette R. A threshold equation for action potential initiation // PLoS Computational Biology. 2010. № 6. e1000850.*

²³ [5] *Gefter A. The man who tried to redeem the world with logic // Nautilus. 2015. 5 февраля. URL: <http://nautilus.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic>; Smalheiser N. R. Walter Pitts // Perspectives in Biology and Medicine. 2000. № 43. С. 217–226.*

Если вы что-нибудь знаете о внутреннем устройстве компьютера – системного блока на вашем столе, ноутбука на ваших коленях, планшета в ваших руках, телефона в кармане, – вы можете в этот момент мысленно воскликнуть: «Ага! Двоичный код! Значит, мозг – это компьютер!» Но здесь мы имеем дело скорее с обратным: современный компьютер, основанный на дискретной двоичной логике, – это модель мозга.

Джон фон Нейман заложил теоретические основы архитектуры любого современного электронного компьютерного оборудования в 1945 году ²⁴. Фон Нейман хорошо знал Маккаллока и следил за их совместными работами с Питтсом. Создавая электрические схемы элементарных логических ячеек, срабатывающих от определенного сочетания нулей и единиц на входе, он использовал их идеи о возможности объединять эти элементы для выполнения логических операций в разработке архитектуры вычислительного компьютера. В самом деле, на протяжении всего отчета, описывающего архитектуру EDVAC ²⁵, фон Нейман говорит о своем компьютере как о модели работы мозга. Любое современное компьютерное оборудование создано на основе изучения устройства мозга, а не наоборот.

Недвоично!

Для вашего организма, сидящего за офисным столом, страдающего от полуденной сонливости и желания подкрепиться, ответ на вопрос «Почему именно импульсы?» можно сформулировать прозаично: чтобы добыть пропитание. На столе напротив стоит картонная коробочка, повернутая так, что приподнятая крышка, на которой жирным черным фломастером детской рукой выведены крупные, расположенные вверх ногами буквы «ПЕЧЕНЬЕ», почти – но все же не совсем – закрывает содержимое коробочки.

Когда ваш взгляд, блуждающий по этой картине, падает на краешек последнего, одинокого, соблазнительного печенья, находящегося внутри, свет, отразившийся от него, проходит через роговицу и хрусталик вашего глаза, падает на сетчатку и возбуждает там первые нейроны. И здесь мы сталкиваемся с чем-то совершенно неожиданным. Первые два слоя зрительных нейронов не используют для общения друг с другом двоичные импульсы. Они передают друг другу сообщения непрерывно, а не дискретно, при помощи уровней напряжения и выбросов химических веществ.

Свет – фотоны, отражающиеся от стола, коробочки и печенья, – попадает в колбочки, расположенные в первом слое нейронов вашей сетчатки, в самой задней части глаза, за линзой хрусталика. Честно говоря, принцип работы нейронов-колбочек кажется немного странным. Пока на них не упал свет, они постоянно испускают поток молекул на синапсы нейронов второго слоя: то есть эти фоторецепторы, детекторы света, постоянно посылают сообщения об отсутствии света. Когда колбочка поглощает фотон, ее мембранный потенциал на короткое время падает, и постоянный поток молекул на мгновение приостанавливается. Второй слой нейронов, биполярные клетки, считывает эту паузу как сигнал и преобразует ее в изменение своего потенциала. Некоторые биполярные клетки предпочитают темноту, поэтому они преобразуют эту химическую паузу в падение своего электрического потенциала; другие жаждут света, поэтому химическая пауза вызывает увеличение их потенциала. Эти первые два слоя нейронов с помощью химических сигналов превращают свет в напряжение, но при этом между ними не происходит обмена импульсами.

²⁴ [6] *von Neumann J.* First draft of a report on the EDVAC // 1945 Technical Report / под ред. M. D Godfrey. URL: <http://web.mit.edu/STS.035/www/PDFs/edvac.pdf>.

²⁵ {3} EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer, Электронный дискретно-переменный автоматический вычислитель) – одна из первых электронных вычислительных машин. В отличие от своего предшественника ЭНИАКа это был компьютер на двоичной, а не десятичной основе. – *Прим. пер.*

Второй слой зрительных нейронов передает сообщение по эстафете третьему. И здесь опять используется тот же механизм, только наоборот. Биполярные клетки во втором слое постоянно высвобождают молекулы на синапсы нейронов третьего слоя, но на этот раз их количество пропорционально потенциалу возбуждения биполярного нейрона: чем выше потенциал, тем больше молекул. В свою очередь получение этих молекул пропорционально изменяет потенциал нейронов третьего слоя. В процессе передачи от второго к третьему слою потенциал возбуждения превращается в концентрацию химических веществ и снова в мембранный потенциал. Многие нейроны в третьем слое представляют собой ганглиозные клетки – именно они общаются с остальной частью мозга, и для этого ганглиозные клетки превращают свой электрический потенциал в бинарные – «все или ничего» – импульсы.

Даже из такого поверхностного описания ясно, что сетчатка – это не просто пассивный фотодатчик, а сложный мини-мозг, вычислитель, состоящий из множества комплекующих²⁶. Фотодетекторами у людей работают три типа нейронов-колбочек, чувствительных к трем соответствующим диапазонам длины световой волны, которые мы описываем как красный, зеленый и синий. А еще нейроны-палочки, позволяющие видеть в темноте, которых намного больше, чем колбочек. Итого по крайней мере девять типов биполярных клеток во втором слое плюс сложная сеть, образованная горизонтальными нейронами, которая контролирует поток молекул от колбочек ко второму слою, и более сорока типов амакриновых нейронов в третьем слое, чья работа состоит в управлении потоком молекул из второго слоя в третий. Из этих пятидесяти с лишним типов нейронов в первом и втором слоях сетчатки подавляющее большинство не используют импульсы для отправки сообщений.

(Отсутствие импульсов в системе нервных клеток глаза означает, что его нейроны не могут выполнять логические операции, столь любимые Маккаллоком и Питтсом. Когда в 1950-х годах друзья Питтса из Массачусетского технологического института представили первое веское доказательство того, что во взаимодействии нервных клеток глаза бинарная логика отсутствует²⁷, Питтс с отвращением сжег свою диссертацию, посвященную логике работы мозга²⁸.)

²⁶ [7] На самом деле даже связи, существующие между тремя слоями сетчатки глаза млекопитающего, уже настолько замысловаты, что заставляют задуматься, сможем ли мы разобраться в работе гораздо более сложно устроенного головного мозга. Для тех, кому нравятся технические подробности, вот краткий курс по устройству сетчатки. Колбочки первого слоя высвобождают глутамат на синапсы биполярных клеток второго слоя, а также на горизонтальные клетки. Задача биполярных клеток состоит в том, чтобы принимать информацию от колбочек и передавать ее клеткам третьего слоя. Работа горизонтальных клеток, имеющих разветвленную систему синапсов, соединенных с другими такими же клетками, заключается в том, чтобы подавлять передачу сигнала от колбочек к биполярным клеткам; они передают информацию друг другу на расстояния, значительно удаленные от соединенных с ними колбочек. Это создает конкуренцию сигналов: реакция биполярных клеток, находящихся дальше от активной колбочки, подавляется, чтобы реакция биполярных клеток рядом с активной горизонтальной клеткой или клетками, наоборот, выделялась на общем фоне. Электрический потенциал биполярных клеток изменяется пропорционально величине паузы в выделении глутамата, который они получают от того типа колбочки (или колбочек), с которым они связаны. Биполярные клетки бывают двух видов: on- и off-биполяры. Клетки on-типа увеличивают свой электрический потенциал в ответ на паузы, сигнализируя об обнаружении фотонов; off-клетки уменьшают свое напряжение в ответ на паузы, сигнализируя об уменьшении темноты. В свою очередь все биполярные клетки выделяют глутамат пропорционально своему электрическому потенциалу на синапсы нейронов третьего слоя – ганглиозных клеток сетчатки (тех, которые передают импульсы в мозг) и амакриновых клеток (которые подавляют ганглиозные клетки и/или осуществляют ингибирующую обратную связь к биполярным клеткам). В сетчатке мышей присутствует как минимум девять типов биполярных клеток и по крайней мере сорок типов амакриновых клеток. Количество типов определяется тем, на какие стимулы они реагируют. Подробное описание схемы функционирования сетчатки см.: *Demb J. B., Singer J. H. Functional circuitry of the retina // Annual Review of Vision Science. 2015. № 1. С. 263–269.* Мы знаем о биполярных клетках абсурдно много: см. *Euler T., Haverkamp S., Schubert T. u др. Retinal bipolar cells: Elementary building blocks of vision// Nature Reviews Neuroscience. 2014. № 15. С. 507–519.* Подробное описание того, почему сетчатка устроена таким образом, см. в главе 11 книги: *Sterling P., Laughlin S. B. Principles of Neural Design. MIT Press, 2015.* Для тех, кто хочет продвинуться дальше, – полезный онлайн-учебник Webvision от Хельги Колб и ее коллег: <https://webvision.med.utah.edu/>.

²⁷ [4] Речь о работе 1959 года, ставшей классической, «Что говорит глаз лягушки мозгу лягушки». – *Прим. пер.*

²⁸ [8] Geffer A. The man who tried to redeem the world with logic // *Nautilus*. 2015. 5 февраля. URL: <http://nautil.us/issue/21/information/the-man-who-tried-to-redeem-the-world-with-logic>.

Если такое количество нейронов сетчатки спокойно обходится без импульсов, почему тогда другие нейроны все же используют их? Зачем преобразовывать гибкий, непрерывный, аналоговый сигнал потоков молекул и электрических потенциалов в дискретный, бинарный, двоичный – зачем, казалось бы, отбрасывать полезную информацию?

Ответ прост: импульсы позволяют нейронам передавать информацию точно, быстро и далеко.

Точно, быстро и далеко

Точно

Импульс – это временной маркер, сообщение, несущее информацию из разряда «что-то произошло прямо сейчас». Это может быть незначительное изменение в потоке света, падающего на сетчатку лягушки, вызванное небольшим движением маленького изогнутого темного объекта. Это может быть писк микроволновки, сообщающий, что остатки вчерашнего карри разогреты. Это может быть внезапное усиление давления на боковые мышцы языка, когда вы рассеянно прикусываете его коренными зубами. То, что произошло, почти наверняка привело к изменению в серии импульсов, приходящих от других нейронов в данный нейрон, – это интересная история, которую мы расскажем в следующей главе.

На создание импульса у нейрона уходит меньше миллисекунды, поэтому сам импульс может фиксировать время события с точностью до миллисекунды. Следовательно, импульсы – это сигналы, которые с чрезвычайной точностью фиксируют время события во внешнем мире.

Прекрасный пример исключительной точности нервных импульсов – то, как мозг крысы получает информацию от ее усов. Система усов-вибрисс у грызунов – излюбленный объект исследований нейробиологов, пытающихся понять, как мозг обрабатывает сенсорную информацию, поскольку она состоит из небольшого количества деталей.

У крысы всего от 30 до 35 основных вибрисс с каждой стороны морды²⁹, расположенных пятью аккуратными рядами, что по сложности несравнимо с более чем шестью миллионами колбочек в человеческом глазу. Мы можем проследить путь от нерва у основания усика до мозга и точно определить, какие нейроны реагируют на сигнал от каждого из них. Определив нейроны, получающие сигналы от одной конкретной вибриссы, мы можем, шелкая по ней, следить за ними и регистрировать реакцию.

Лаборатория Расмуса Петерсена в Манчестерском университете занималась в 2015 году во время экспериментов под руководством Майкла Бейла именно этим, чтобы выяснить, насколько точно каждый из первичных нейронов может посылать импульсы-сообщения³⁰. Они использовали крошечный моторчик, чтобы быстро и в случайном порядке приводить вибриссу в движение, и повторяли один и тот же шаблон движений неоднократно, записывая сигнал с одного из нейронов, связанных с основанием этого усика. Каждый подобный сеанс дерганья крысы за усы заставлял нейрон посылать определенную морзянку импульсов. Если ритмичная последовательность импульсов являлась сообщением об изменениях, ощущаемых усиком – возможно, о том, как быстро он движется или насколько сильно он изогнут, – то она должна довольно точно повторяться при каждом сеансе воздействия одним и тем же шаблоном движений.

Последовательность повторялась настолько точно, что лаборатория Петерсена столкнулась с техническими ограничениями своего высокотехнологичного регистратора. Мы живем

²⁹ [9] Brecht M., Preilowski B., Merzenich M. M. Functional architecture of the mystacial vibrissae // Behavioural Brain Research. 1997. № 84. С. 81–97.

³⁰ [10] Bale M. R., Campagner D., Erskine A. и др. Microsecond-scale timing precision in rodent trigeminal primary afferents // Journal of Neuroscience. 2015. № 35. С. 5935–5940.

в эпоху цифровых технологий, поэтому прибор, регистрирующий потенциал на электроде, расположенном рядом с чувствительным нейроном вибриссы, производил запись значений с частотой 24,4 кГц – то есть считывание показаний происходило 24 400 раз в секунду. Даже при таком абсурдно детальном временном разрешении казалось, что все импульсы происходили точно в один и тот же момент каждый раз, когда исследователи воспроизводили последовательность воздействий на вибриссу. «Точно в один и тот же момент» означает, что нервные импульсы в последовательности, отправляемой нейроном в ответ на набор движений вибриссы, повторяемый машиной, следовали каждый раз с точностью в пределах 41 микросекунды друг от друга. Это невообразимо крошечный промежуток времени: если на первой серии механических воздействий импульс регистрировался, скажем, на отметке 3,68092 секунды, то при многократном повторении он каждый раз оказывался на записи где-то между отметками 3,68091 и 3,68092 секунды. Столкнувшись с ограничениями используемых технологий, исследователи из лаборатории Петерсена были вынуждены собрать специальный электронный прибор для записи измерений с гораздо большей частотой дискретизации – 500 кГц, то есть считыванием показаний с электрода 500 000 раз в секунду, – чтобы выяснить, насколько точно повторялись импульсы.

Ученые использовали этот новый измеритель, чтобы определить абсолютный предел точности, с которой нейрон может отправлять импульсы в ответ на внешний раздражитель. Они проанализировали видеозаписи, на которых крысы используют свои усы, чтобы найти максимально быстрое движение, которое может совершить вибрисса, поскольку чем быстрее движение, тем точнее должны отправляться нервные импульсы, которые оно вызовет. Используя свой механизм с моторчиком, чтобы многократно перемещать вибриссу одним сверхбыстрым движением, они регистрировали время, которое требовалось для отправки первого импульса. Удивительно, но самый пунктуальный нейрон каждый раз отправлял этот первый импульс в течение примерно пяти микросекунд от начала движения. Благодаря импульсам вибриссы могут с исключительной точностью сообщать мозгу крысы, что с ними происходит.

То, что импульсы от сенсорных клеток на вибриссах крыс очень точны, неслучайно. Они жизненно важны для этих животных³¹. Грызуны ищут пищу в темноте, где острое зрение бесполезно, поэтому крысиные глаза работают довольно паршиво: их основная задача – не давать детальной картины окружающего ее мира, а лишь различать в нем предметы с достаточной уверенностью, чтобы определить, к чему стоит приближаться, а от чего убежать. Усами крысы ощупывают предметы и определяют, что перед ними. Их усы постоянно двигаются взад и вперед, примерно восемь раз в секунду, обнаруживая препятствия и изучая обстановку. Положите перед крысой детальку Lego, и она не сможет сказать вам, какого та цвета. Но крыса будет тщательно исследовать ее усами, сгибая их об нее и слегка поглаживая, чтобы понять форму и текстуру³². Вибриссы для крысы – то же самое, что глаза для нас; когда она действительно хочет что-то внимательно изучить, то будет «разглядывать» это усами: крыса складывает усы вперед, чтобы они касались этого предмета, а затем вибрирует ими с частотой, в четыре раза превышающей их обычную поисковую активность³³. Какая удача, что нервные клетки вибриссы, посылающие импульсы в крысиный мозг, могут делать это с такой точностью.

Быстро

³¹ [11] Muchlinski M. N., Wible J. R., Corfe I. *u dp.* Good vibrations: The evolution of whisking in small mammals // *Anatomical Record*. 2020. № 303. С. 89–99.

³² [12] Mitchinson B., Martin Ch. J., Grant R. A. *u dp.* Feedback control in active sensing: Rat exploratory whisking is modulated by environmental contact // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2007. № 27. С. 1035–1041; Grant R. A., Mitchinson B. *u dp.* Active touch sensing in the rat: Anticipatory and regulatory control of whisker movements during surface exploration // *Journal of Neurophysiology*. 2009. № 101. С. 862–874.

³³ [13] Berg R. W., Kleinfeld D. Rhythmic whisking by rat: Retraction as well as protraction of the vibrissae is under active muscular control // *Journal of Neurophysiology*. 2003. № 89. С. 104–117.

Стремительные события, происходящие во внешнем мире, требуют, чтобы информация о его изменениях быстро передавалась в мозг, быстро обрабатывалась там и быстро отправлялась к другим органам. Потрогайте кончик усика крысы, и она тут же повернет голову. Ваш блуждающий по офису взгляд останавливается на печенье, и вам нужно быстро принять решение: схватить его, или это будет неприлично. С помощью импульсов мозг решает проблему скорости передачи информации.

Почти у всех нейронов в вашем мозгу есть только один аксон, специализированный кабель, отходящий от тела клетки, который передает импульсы этого нейрона к месту назначения. Строение некоторых аксонов предназначено для скоростной передачи импульса. По аксону в коре головного мозга импульс может перемещаться со средней скоростью около 200 миллиметров в секунду, преодолевая расстояние от задней части коры к передней менее чем за секунду³⁴. Сенсорные аксоны в спинном мозге передают сигнал в сотни раз быстрее³⁵: по седалищному нерву землеройки импульс несется со скоростью 42 метра в секунду, а у слона – 70 метров в секунду! Это 252 километра в час. Нервные волокна слона еще потягиваются с «фerrари».

Передача информации между нейронами любым другим способом происходит намного медленнее. Импульс пробегает по аксону в 20 раз быстрее, чем когда нейрон передает сигнал изменением потенциала всей клетки, и в тысячу раз быстрее, чем при высвобождении молекул на синапсах³⁶. Для передачи непрерывных, а не двоичных сообщений между парой нейронов необходимо, чтобы они соприкасались друг с другом, тогда малая скорость передачи сигнала будет компенсироваться ничтожным расстоянием. Так это работает в первых слоях сетчатки, где биполярные нейроны непосредственно соприкасаются с колбочками. Однако понадобится не менее 700 крупных нейронов, чтобы они покрыли расстояние от затылочной до лобной части коры вашего головного мозга³⁷. Отправка аналогового сообщения по такой цепочке методом «пожарного ведра», когда оно передается, так сказать, из рук в руки от одного соседа другому, займет невероятно много времени. Хуже того, с каждой последующей передачей есть шанс, что в спешке часть воды из ведра выплеснется, то есть сообщение будет искажено или загрязнено шумом. Несколько сотен таких передач испортят любое сообщение, превратив его, как в игре в испорченный телефон, из «в коробке лежит печенье» в «робко дрожит мошенник» – оставив вас голодным и довольно озадаченным по пути на общее собрание сотрудников. Отправка импульсов по быстрым аксонам позволяет решить эти проблемы.

³⁴ [14] Это оценка «по прямой»: размер человеческого мозга от затылка ко лбу – в среднем около 15–16 см. Конечно, импульс не может перемещаться по прямой; воображаемый аксон, по которому этот импульс передается из затылочной в лобную долю коры, сначала уйдет вниз, в лежащее под корой белое вещество, состоящее в основном из пучков аксонов, и пройдет через него по криволинейной траектории, прежде чем подняться обратно в кору лобной части. В главе 4 мы рассмотрим это подробнее.

³⁵ [15] *More H. L., Hutchinson J. R., Collins D. F. et al.* Scaling of sensorimotor control in terrestrial mammals // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010. № 277. С. 3563–3568.

³⁶ [16] *Sterling P., Laughlin S.* Principles of Neural Design. MIT Press, 2015. Гл. 7.

³⁷ [17] Оценка количества кортикальных клеток, необходимых, чтобы непрерывно перекрыть всю длину коры головного мозга, основывается на данных, полученных в исследованиях на крысах (Romand и др.). По двум причинам: (1) нейробиологи ведут большинство исследований на лабораторных крысах; (2) кора головного мозга крысы не столь извилиста, как кора головного мозга человека, поэтому измерение расстояния по прямой имеет смысл. То, что кора головного мозга человека представляет собой как бы оболочку шара, означает, что, вероятно, необходимо гораздо больше последовательно расположенных нейронов, чтобы выстроить цепочку от затылочной к лобной части кортекса, чем приведенная, сильно заниженная, оценка. Вот основа моих расчетов: длина коры у взрослых крыс ~ 14 мм. Клетки Беца – глутаматергические пирамидальные нейроны пятого слоя первичной моторной коры головного мозга – одни из самых больших нейронов центральной нервной системы, их диаметр достигает 100 мкм у человека и 20 мкм у крыс. Таким образом мы можем разместить 700 таких тел нейронов цепочкой рядом друг с другом на расстоянии от передней до задней части коры. См.: *Romand S., Wang Y., Toledo-Rodriguez M. et al.* Morphological development of thick-tufted layer V pyramidal cells in the rat somatosensory cortex // *Frontiers in Neuroanatomy*. 2011. № 5. С. 5.

Так что скорость – вторая причина, по которой вибриссы крыс отправляют информацию в мозг с помощью импульсов. Когда крыса бежит в темноте, ее усы касаются поверхности впереди, чтобы животное могло быть уверено, что путь свободен, не провалилось в яму, не налетело на препятствие или другую крысу. Крыса бежит очень быстро, на каждом шаге ее передняя лапа опускается туда, где ее вибриссы были около 200 миллисекунд назад³⁸. Это означает, что у мозга крысы есть в распоряжении менее 0,2 секунды, чтобы принять поток информации от 70 вибрисс, расшифровать его смысл и принять решение о реакции: внести поправки в сигналы, отправляемые к мышцам лап, хвоста и тела, чтобы продолжить бег, совершить прыжок или резко остановиться. Отправка импульсов дает возможность чувствительным нервным клеткам у основания вибрисс передавать информацию в мозг крысы, а мозгу – отправлять команды мышцам лап точно и быстро.

Далеко

Большие тела – а в масштабе нейрона «большим» считается все, что различимо невооруженным глазом, например личинка мухи, – нуждаются в том, чтобы их нервные клетки отправляли сообщения на расстояния, намного превышающие размер одного нейрона. Такие, скажем, как расстояние от осязательных окончаний в пальцах до спинного мозга, чтобы датчики температуры и давления на кончике пальца могли передать вашему мозгу, что он, дистанционно управляя мышцами, поместил ваш палец во что-то холодное, склизкое и мягкое, и не мог бы он остановиться прямо сейчас, пожалуйста, это похоже на слизняка, это слизняк – фу, гадость! Импульсы решают проблему передачи точных и быстрых сообщений на большие расстояния.

Импульс может распространяться по аксону любой длины, вплоть до нескольких метров. Аксоны, соединяющие соседние нейроны, тонкие, а те, что соединяют отдаленные нейроны, – намного толще. Чем длиннее аксон, тем, как правило, больше его диаметр и тем быстрее движется по нему импульс. Многие аксоны, соединяющие отдаленные друг от друга клетки, покрыты равномерно расположенными участками оболочки из миелина – жировой массы, которая служит изолятором. У миелиновой оболочки две функции: она позволяет импульсу быстро и без влияния на него внешних помех перемещаться через изолированные участки, а в промежутке между изоляторами находятся наборы тех же каналов в мембране, что и в теле нейрона, которые повторяют цикл открытия и закрытия, регенерируя импульс. Это как бы станции-ретрансляторы, на которых сигнал усиливается, чтобы он мог дойти до адресата в целостности и сохранности.

Отправка сообщений между удаленными нейронами любым другим способом обречена на провал. Химический сигнал через высвобождение молекул может передать информацию через крошечные промежутки между клетками, как мы видели на примере сетчатки глаза (мы снова вернемся к этому в следующей главе). Но молекулы, выпущенные в солевой раствор, окружающий нейроны, будут быстро рассеиваться, а их концентрация – уменьшаться пропорционально кубу расстояния от того места, где они были выпущены; так что химическая передача информации на расстояния больше нескольких микрометров неработоспособна. Электрический потенциал самой клетки нейрона падает обратно пропорционально расстоянию от нее, поэтому его изменения потеряются на фоне электрического шума в пределах 1–2 миллиметров. Отправка импульса по аксону позволяет нейрону осуществлять коммуникацию на расстоянии, в сто тысяч раз превышающем размер его собственного тела. Если бы тело нейрона, осуществляющего передачу сигнала из спинного мозга жирафа к мышце его задней ноги, было размером с Землю, длина его аксона превысила бы расстояние до Солнца³⁹.

³⁸ [18] Grant R. A., Breakell V., Prescott T. J. Whisker touch sensing guides locomotion in small, quadrupedal mammals // Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. 2018. № 285. 20180592.

³⁹ [19] Нейрон с двухметровым аксоном посылает сигнал относительно размера своего тела дальше, чем расстояние от Земли до Солнца. Расстояние от Земли до Солнца составляет в среднем 149 600 000 км, а диаметр Земли на экваторе составляет 12 756 км. Таким образом расстояние от Земли до Солнца составляет около 11 723 диаметров Земли. Теперь возь-

Жираф

Жирафы – забавные животные. Сам факт их жизнеспособности целиком и полностью объясняется тем, что нервные клетки способны отправлять информацию точно, быстро и далеко. Абсурдно длинная шея означает, что мозг жирафа находится на расстоянии до 5,5 метров от его ступней (окей, не ступней, копыт). И тут возникает довольно серьезная коммуникационно-управленческая проблема. Как жираф, бегущий по открытой саванне, не превращается в унижительную кучу перепутанных конечностей каждый раз, когда его копыто цепляется за камень или ветку, или наступает на спящую гиену, не ожидавшую подобной наглости? Его мозг должен успеть на все это отреагировать.

Чтобы жираф не превратился в кучу переплетенных ног со сломанной шеей, до потери равновесия необходимо как минимум успеть передать сообщение от сенсорных датчиков в копыте к спинному мозгу, объединить с сообщениями, идущими из головного мозга, и затем скорректировать аллюр, изменяя сигналы, посылаемые мышцам ног от моторных нейронов. Поэтому, когда жираф спотыкается, импульсы от множества сенсорных нейронов отправляются в его спинной мозг моментально и одновременно. По аксонам, соединяющим чувствительные клетки копыта жирафа со спинным мозгом, импульсы бегут со скоростью более 50 метров в секунду. Аксоны, которые передают управляющие сигналы от спинного мозга к мышцам ног, работают с той же скоростью. И один подобный нервный проводник позволяет передать сигнал на столь значительные расстояния без десятков лишних остановок по пути.

Точно, быстро и далеко: когда жираф запинаясь копытом о препятствие, он успевает отдернуть ногу назад и скорректировать свои движения за десятки миллисекунд, несмотря на то что рефлекторные нейроны в его спинном мозге расположены в нескольких метрах от кончиков копыт.

мем нейрон с аксоном длиной два метра. Допустим, размер его тела составляет около 20 микрометров (что довольно много по клеточным меркам) – тогда его аксон в 100 000 раз длиннее, чем диаметр тела нейрона. (Если вы педант и хотите учесть в сравнении не только тело нейрона, но и его дендриты, то, учитывая, что их общий размер составил бы, скажем, 200 микрометров, аксон все равно окажется в 10 000 раз длиннее.)

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на ЛитРес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.