

ДИН БУОНОМАНО



МОЗГ
**ПОВЕЛИТЕЛЬ
ВРЕМЕНИ**

**КАК НАШ МОЗГ
ЧУВСТВУЕТ И ИЗМЕРЯЕТ
ХОД ВРЕМЕНИ**



Вы смогли скачать эту книгу бесплатно на законных основаниях благодаря проекту «**Дигитека**». [Дигитека](#) — это цифровая коллекция лучших научно-популярных книг по самым важным темам — о том, как устроены мы сами и окружающий нас мир.

Дигитека создается командой научно-просветительской программы «[Всенаука](#)». Чтобы сделать умные книги доступными для всех и при этом достойно вознаградить авторов и издателей, «Всенаука» организовала всенародный сбор средств.

Мы от всего сердца благодарим всех, кто помог освободить лучшие научно-популярные книги из оков рынка! Наша особая благодарность — тем, кто сделал самые значительные пожертвования (имена указаны в порядке поступления вкладов):

Дмитрий Зимин
Алексей Сейкин
Николай Кочкин
Роман Гольд
Максим Кузьмич
Арсений Лозбень
Михаил Бурцев
Ислам Курсаев
Артем Шевченко
Евгений Шевелев
Александр Анисимов
Михаил Калябин
Роман Мойсеев
Никита Скабцов
Святослав Сюрин
Евдоким Шевелев

Мы также от имени всех читателей благодарим за финансовую и организационную помощь:

Российскую государственную библиотеку
Компанию «Яндекс»
Фонд поддержки культурных и образовательных проектов «Русский глобус».

Этот экземпляр книги предназначен только для вашего личного использования. Его распространение, в том числе для извлечения коммерческой выгоды, не допускается.

Большая наука

Дин Буономано

Мозг – повелитель времени

«ЭКСМО»

2017

УДК 612.82
ББК 28.707.3

Буономано Д.

Мозг – повелитель времени / Д. Буономано — «Эксмо»,
2017 — (Большая наука)

ISBN 978-5-04-095335-6

Где хранятся наши воспоминания и можно ли предвидеть будущее?
Человеческий мозг совершенно по-особому относится ко времени, отсюда и шестое чувство, и ощущение быстротечности и стремительности жизни. Как это работает, выяснил известный американский нейробиолог Дин Буономано с помощью результатов революционных исследований. Как же наш мозг ощущает и считывает время? Что такое чувство времени? Как связано оно с распознаванием речи и музыки? Можно ли на самом деле путешествовать во времени? Ответы — в этом бестселлере серии «Большая наука».

УДК 612.82
ББК 28.707.3

ISBN 978-5-04-095335-6

© Буономано Д., 2017
© Эксмо, 2017

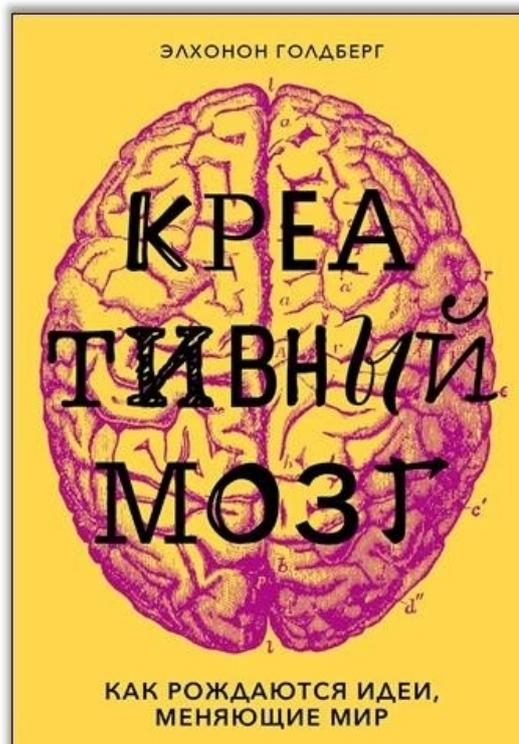
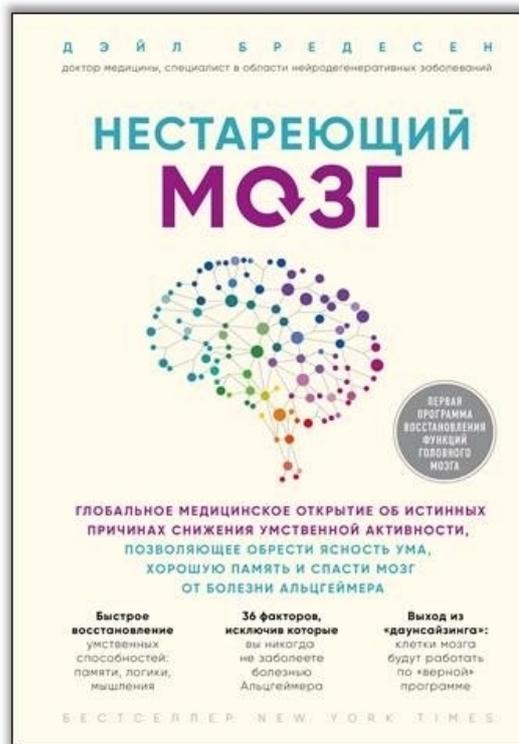
Содержание

КНИГИ О ТАЙНАХ НАШЕГО МОЗГА	6
ЧАСТЬ I	8
1:00	8
2:00	19
3:00	30
4:00	45
5:00	59
6:00	73
ЧАСТЬ II	91
7:00	91
8:00	103
9:00	112
10:00	128
11:00	139
12:00	152
БЛАГОДАРНОСТИ	165
ЛИТЕРАТУРА	166

Дин Буономано
Мозг – повелитель времени

Посвящается Ане

КНИГИ О ТАЙНАХ НАШЕГО МОЗГА



Тайная жизнь мозга. Как наш мозг думает, чувствует и принимает решения

Как мы принимаем решения? Что такое интуиция, и стоит ли ей доверять? В своей книге аргентинский нейробиолог и спикер TED Talks Мариано Сигман берется разгадать тайны человеческого мозга. Он находит ответы даже на самые неразрешимые вопросы о мышлении и раскрывает настоящую роль нейронауки в нашей жизни.

Нестареющий мозг. Глобальное медицинское открытие об истинных причинах снижения умственной активности, позволяющее обрести ясность ума

Впервые за всю историю человечества разработана система, позволяющая остановить и обернуть вспять развитие заболеваний, которые связаны с мыслительной деятельностью человека: болезнь Альцгеймера, деменцию и др. Специалист в области нейродегенеративных заболеваний, Дейл Бредесен выделил 36 метаболических факторов, которые приводят к снижению умственной деятельности человека. Устранив их, вы сможете быть уверены в своем мозге на 100 % в любой промежуток своей жизни.

Омоложение мозга за две недели

Вы когда-нибудь забывали имена новых знакомых? Пропускали важные даты? Эти и многие другие проблемы вам поможет решить книга профессора психиатрии Гэри Смолла. Как утверждает сам автор, улучшить память и увеличить продуктивность можно всего лишь за две недели.

Креативный мозг. Как рождаются идеи, меняющие мир

Книга нейробиолога и нейропсихолога Элхона Голдберга – это масштабное и увлекательное исследование самой загадочной стороны человеческого разума: способности к творчеству, созиданию, креативности. Обобщая результаты научных открытий, Голдберг рассказывает об удивительных возможностях мозга, его перспективах в эпоху виртуальной реальности и искусственного интеллекта и о том, как стремление к инновациям формирует наше будущее уже сейчас.

ЧАСТЬ I ЧАСЫ МОЗГА

1:00

РАЗНОВИДНОСТИ ВРЕМЕНИ

Единственное, что у нас действительно есть, это время; оно есть даже у тех, у кого больше ничего нет.

БАЛЬТАСАР ГРАСИАН¹

время
человек
год
путь
день

Что общего в этих словах?

Возможно, вы узнали в них пять наиболее часто употребляемых слов английского языка². Но обратите внимание, что в начале списка стоит слово «время», а потом еще два слова, обозначающих единицы времени. Это говорит о том, что понятие времени играет в нашей жизни чрезвычайно важную роль. Мы говорим о времени не только тогда, когда хотим узнать, который сейчас час. Мы постоянно говорим о том, как бы *экономить время, убить время, использовать время, сохранить время...* Мы говорим о *потерях времени, о времени ложиться спать, об оттягивании времени, о хороших временах, о путешествиях во времени, о дополнительном времени, свободном времени* и, конечно, о моем любимом *обеденном времени*.

А ученые и философы толкуют о *субъективном времени, объективном времени, собственном времени, координированном времени, звездном времени, эмерджентном времени, восприятии времени, о времени кодирования, об относительности времени, о клетках времени, о растяжимости времени, о времени реакции, о модели пространства и времени* и даже о *синхронизации времени*.

При этом забавно, что хотя слово «время» относится к числу наиболее часто употребляемых слов, общепринятого определения этого понятия не существует. Известно, что уже 1600 лет назад христианский философ Блаженный Августин подметил сложность определения времени: «Что такое время? Если меня об этом не спрашивают, я знаю, что это такое. Но если я попытаюсь ответить на этот вопрос, у меня нет ответа».

На свете не так много вопросов, которые обладают такой глубиной и сложностью, как вопрос о сути времени. Философы размышляют над тем, что такое время, и над тем, является ли эта категория характеристикой одного конкретного момента или целого измерения. Физиков волнует, что у времени есть только одно направление, их интересует возможность перемещений во времени, а некоторые и вовсе сомневаются в существовании времени. Нейробиологи и психологи пытаются понять, что значит «чувствовать» ход времени, как мозг определяет время, и почему люди обладают уникальной способностью предвидеть развитие ситуации во

¹ Бальтасар Грасиан – испанский писатель и философ XVII в. – *Прим. ред.*

² <http://oxforddictionaries.com/words/the-oec-facts-about-the-language>.

времени. Кроме того, понятие времени занимает важнейшее место в концепции свободы воли: свободен ли наш путь в будущее или предопределен прошлым?

Цель данной книги – проанализировать эти вопросы и по возможности найти на них ответы. Но приступая к решению этой задачи, необходимо признать, что возможность ответить на вопросы относительно времени определяется природой того органа, который ставит перед нами эти вопросы. Хотя заключенная в черепную коробку желеобразная масса, состоящая из 100 млрд клеток, представляет собой самое сложное устройство во всей вселенной, это устройство не было «спроектировано» для понимания природы времени – как ваш компьютер не был спроектирован для создания собственного программного обеспечения. Таким образом, по мере изучения проблемы времени мы постоянно будем осознавать, что наши представления и теории о времени отражают особенности строения и ограниченность возможностей нашего мозга.

ОТКРЫТИЕ ВРЕМЕНИ

Время – понятие сложное, сложнее понятия пространства.

Это верно, что у пространства больше измерений: для определения положения какой-либо точки в пространстве требуется указать три координаты (например, широту, долготу и высоту), тогда как любой момент времени задается лишь одним числом. Поэтому в каком-то смысле *пространство* сложнее, но я имею в виду, что человеческому мозгу понять смысл *времени* намного труднее, чем смысл *пространства*.

Рассмотрим в качестве примера позвоночных животных, поскольку устройство нервной системы человека во многом аналогично устройству нервной системы всех позвоночных. Позвоночные животные способны ориентироваться в пространстве, создавать собственные внутренние карты окружающего мира и в каком-то смысле «понимать» концепцию пространства. Животные перемещаются на дальние расстояния с совершенно четкой целью достичь определенного места; они помнят, где спрятали еду; и даже детеныши домашних животных знают, что если за диван упало что-то вкусное, диван можно обойти слева, справа, сверху или снизу. Нам известно, что в мозге млекопитающих существует чрезвычайно сложная карта окружающего пространства; об этом нам рассказали находящиеся в гиппокампе так называемые *клетки места*, о существовании которых ученые знают уже более 40 лет. Клетки места – это нейроны, которые возбуждаются, когда животное оказывается в определенном месте – в конкретной точке пространства. Все вместе эти клетки формируют в головном мозге сеть, отражающую структуру окружающего пространства – как система GPS, только гораздо более гибкая. Например, наши внутренние карты, по-видимому, постоянно обновляются по мере изменения границ помещений или перестановки предметов.

Но животные не только перемещаются в пространстве, но и «видят» его³. Стоя на вершине горы, мы видим небо над головой, лес под ногами и ленту реки, впадающей в океан, – все на своих местах в пространстве. Мы можем также «слышать» пространство – то есть локализовать участок пространства, из которого доносится звук. Осязательная способность (соматосенсорная функция) позволяет получать информацию не только о положении и форме предметов, но и о положении важнейших измерительных инструментов – наших собственных конечностей.

Со временем все обстоит иначе. Животные не могут физически перемещаться во времени. На дороге времени нет перекрестков, разветвлений, съездов или поворотов. Возможно, именно по этой причине нет заметного эволюционного давления, которое заставило бы животных создавать карту времени и ориентироваться в нем с такой же легкостью, как в простран-

³ Точнее, видят распределенные в пространстве предметы.

стве. Далее мы поговорим о том, что животные умеют определять время и предвидеть различные события, но у нас нет оснований утверждать, что наши братья позвоночные понимают разницу между прошлым, настоящим и будущим в такой же степени, как они понимают разницу между движением вверх, вниз, влево или вправо. Наши органы чувств напрямую не регистрируют течение времени⁴. В отличие от трафальмадорцев из фантастического романа Курта Воннегута «Бойня номер пять», мы не можем видеть сквозь время, одним взглядом охватывая прошлое, настоящее и будущее.

Мозг всех животных, включая человека, лучше оснащен для того, чтобы перемещаться, ориентироваться и разбираться в пространстве, чем во времени. Одна из теорий, объясняющих осознание человеком понятия времени, утверждает, что для восприятия времени мозг использует те же сети нейронов, с помощью которых он воспринимает и оценивает пространство (глава 10). Как мы увидим далее, возможно, именно по этой причине в культуре многих народов для обсуждения времени используются пространственные метафоры (был *длинный* день; мы с надеждой смотрим *вперед*; *задним* числом я понимаю, что лучше было промолчать).

Для ученых концепция времени тоже сложнее концепции пространства. Различные сферы науки, как и люди, проходят через несколько стадий развития: они созревают и меняются по мере роста. И одним из признаков взросления многих областей науки является постепенное обращение к изучению вопроса времени.

Первой истинной наукой, безусловно, была геометрия. Отправной точкой для ее развития стали работы Евклида в III в. до н.э. Геометрию часто называют «разделом математики, изучающим свойства точек, линий, поверхностей и твердых тел и связей между ними»⁵. Евклидова геометрия замечательна не только тем, что является одной из наиболее изящных и трансформируемых теорий в истории науки, но и тем, что этот высокий статус она получила при полном отсутствии внимания к вопросу времени. Геометрию следовало бы называть «пространствометрией» – изучением вещей, которые «заморожены» во времени и никогда не меняются. Именно по этой причине геометрия была одной из первых истинно научных дисциплин – все оказывается гораздо проще, если можно игнорировать фактор времени.

Математический аппарат греческих ученых и философов не был приспособлен для изучения временных изменений. Более того, в античный период люди гораздо лучше умели измерять расстояние, чем время. Сегодня ситуация изменилась, и мы измеряем время с гораздо большей точностью, чем расстояние (глава 7). Только через почти 2000 лет после Евклида математика и физика стали по-настоящему оперировать понятием времени. Важный шаг в этом направлении был сделан в конце XVI в., когда скучавший в пизанском соборе Галилео Галилей заметил, что люстра под потолком совершает полное колебание за одно и то же время вне зависимости от амплитуды колебания (позднее выяснилось, что период колебаний все же слегка увеличивается с увеличением амплитуды)⁶. Возможно, это вымышленная история, однако, изучая изменения положения предметов во времени, Галилей способствовал рождению динамики. Но, как и греки, Галилей не имел возможности математическим образом описать связь между силами, скоростью и ускорением. Математический аппарат для описания временных изменений – *методы исчисления*⁷ – позднее создали Ньютон и Лейбниц. Исполь-

⁴ Сетчатка некоторых животных содержит клетки, регистрирующие движение – т. е. «перемещение» предметов во времени (и в пространстве). Кроме того, следует отметить, что улитка уха тоже обладает чувством времени, поскольку волосковые клетки внутреннего уха настраиваются на частоту вибрации молекул воздуха, а частота – мера времени полного колебания. Эти частоты слишком велики, чтобы большинство нейронов могло на них реагировать и чтобы мы могли осознанно воспринимать эти колебания.

⁵ Из Оксфордского словаря английского языка.

⁶ Подробнее история маятника изложена в книге Matthews (2000).

⁷ В ряде научно-популярных книг представлен прекрасный обзор истории развития математики и физики (см., например, книгу Пенроуза «Новый ум короля», 1989).

зую эти методы, Ньютон смог сформулировать законы, управляющие падением яблока и вращением планет.

Ньютон верил в абсолютное время, которое «по самой своей сущности протекает само по себе, без всякого отношения к чему-либо внешнему». Он считал, что время универсально для всех точек пространства. Вселенная Ньютона была детерминированной: состояние такой системы в любой момент времени, как в прошлом, так и в будущем, теоретически можно установить, исходя из настоящего. Но история науки на этом не остановилась. Для нас наиболее важно отметить два момента. Во-первых, ученые постепенно начали приходить к (печальному для некоторых) заключению, что даже если вселенная подчиняется прекрасным законам Ньютона, *на практике* не представляется возможным предсказать будущее (или изменить прошлое). Работы многих ученых, включая французского математика Анри Пуанкаре и американского метеоролога Эдварда Лоренца, показали, что минимальные различия в состоянии системы в настоящий момент могут приводить к абсолютно разным результатам в будущем (самый известный пример – *эффект бабочки* в предсказаниях погоды). Такая ситуация называется *хаосом*, и мы увидим, что именно эта ситуация наблюдается, когда речь заходит об изучении самой сложной известной динамической системы – человеческого мозга (глава 6). Вторым важным шагом было устранение Альбертом Эйнштейном ньютоновского понятия абсолютного времени. Эйнштейн показал, что вопреки человеческой интуиции время – параметр относительный (глава 9). Мы поговорим об этом подробнее, сейчас лишь замечу, что по мере взросления физики проблема времени постепенно стала всеобъемлющей и основополагающей (возможно, с некоторыми исключениями). Забавно, что периодически происходят попытки полностью вытеснить параметр времени из физики⁸ и вернуться к геометрически статичной вселенной, которую физик Джулиан Барбур называет *Платонией*: намек на идею Платона о том, что геометрические формы являются реальными сущностями, находящимися в безвременном пространстве.

ВРЕМЯ И НЕЙРОБИОЛОГИЯ

Многие другие области науки тоже проходят через аналогичные стадии созревания. Например, современная биология зародилась в XVIII в., как описательная и статичная классификация живых организмов, но постепенно, по мере взросления, биология включила в себя концепцию времени в форме динамических и эволюционных представлений. Здесь роль Галилея сыграл Дарвин: он увидел, что все виды организмов на Земле находятся в постоянном «движении» – мутируют, исчезают и эволюционируют.

Нейробиология и психология тоже эволюционировали и постепенно включили в себя проблему времени. Можно все что угодно говорить о псевдонауке френологии, но специалисты в этой области признают важность восприятия времени. Они связывают нашу способность чувствовать время с участками лобных долей, находящимися между зонами, ответственными за *модуляцию* и *локализацию* (рис. 1.1). В одном трактате по френологии говорится, что «функция этой способности заключается в регистрации течения времени, длительности и очередности событий и т. д. Она также позволяет запоминать даты, поддерживать такт в музыке и танце, а также способствует пунктуальности и выполнению принятых на себя обязанностей»⁹.

Один из создателей современной психологии, Уильям Джеймс, также признавал важность концепции времени для понимания функционирования мозга. Восприятию времени он посвятил целую главу своего знаменитого трактата «Принципы психологии», опубликованного в 1890 г. Как ни странно, после него этот вопрос затрагивался лишь в нескольких важных кни-

⁸ Barbour, 1999.

⁹ Wells, 1860.

гах по психологии или нейробиологии¹⁰. В целом на протяжении большей части XX в. проблема времени в учебниках по психологии практически не упоминалась.

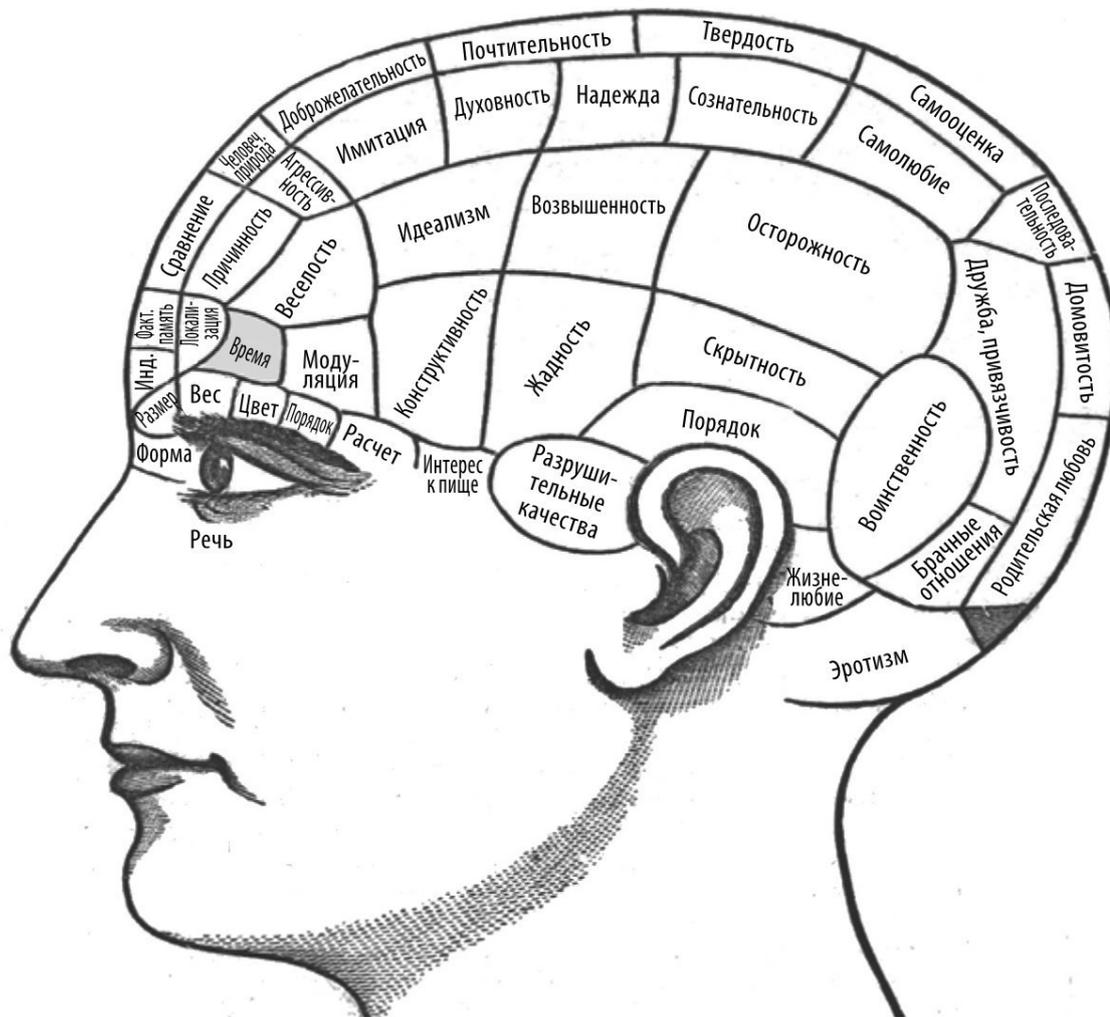


Рис. 1.1. Френологическая карта XIX в.

Согласен, я слегка упрощаю ситуацию. Во-первых, проблема времени в психологии и нейробиологии – это не одна проблема, а целый набор связанных между собой вопросов о том, как мозг отсчитывает время, создает сложные временные образы, осознает течение времени, вспоминает прошлое и предвидит будущее. Во-вторых, в нескольких направлениях психологии и нейробиологии все же были достигнуты значительные успехи в изучении восприятия времени. Например, в XX в. расцвела такая область исследований, как *хронобиология*, занимающаяся изучением биологических ритмов, особенно циклов сна и бодрствования (глава 3). В этот же период было выполнено множество важнейших работ, способствовавших значительному расширению нашего понимания того, как мозг воспринимает время. Но в целом на проблему времени редко обращали внимание. Возьмите, к примеру, библию современной нейробиологии – учебник «Основы нейробиологии» – и попытайтесь в предметно-именном указателе найти наиболее часто встречающееся слово английского языка. Его там нет. Но если

¹⁰ Я слишком упрощаю ситуацию. В середине XX в. было опубликовано несколько серьезных книг и статей, выдержавших испытание временем (см., например, Lashley, 1951, и Fraisse, 1963).

вы попытаетесь найти слово «пространство», вы встретите его многократно в самом разном контексте¹¹.

Психология и нейробиология – новые научные направления, так что они только начинают в полной мере оценивать роль временного и динамического фактора. Психолог Ричард Иври из Калифорнийского университета в Беркли писал в 2008 г.: «Еще поколение назад исследования восприятия времени были ограниченными и включали в себя лишь поведенческие реакции с явными временными закономерностями. Но недавно интерес к изучению восприятия времени появился вновь, и исследователи начали заниматься широким спектром явлений, протекающих во времени»¹².

В качестве примера, отражающего этот сдвиг, рассмотрим отношение к одному из важнейших вопросов психологии и нейробиологии: *как мозг хранит воспоминания?* Поскольку воспоминания касаются опыта из прошлого, память в обязательном порядке связана со временем. Но при этом проблему памяти редко рассматривали во временном контексте. Только в XXI в. ученые начали полностью отдавать себе отчет в том, что «информация о прошлом имеет смысл только в том случае, если позволяет предвидеть, что произойдет в будущем»¹³. Механизм памяти эволюционировал не для того, чтобы мы могли предаваться воспоминаниям. Единственная эволюционная функция памяти заключается в том, что она позволяет животным предсказывать, что и когда может произойти, и как следует реагировать, если что-то произойдет. Благодаря таким концептуальным сдвигам и множеству методологических достижений, нейробиология и психология гораздо больше внимания начали уделять вопросу времени. Более того, мы начинаем осознавать, что без понимания механизмов восприятия и отсчета времени в мозге мы не сможем понять, как функционирует человеческий мозг.

ПРЕЗЕНТИЗМ И ЭТЕРНАЛИЗМ

Эта книга в основном рассматривает вопрос времени в рамках нейробиологии и психологии, но нам также придется уделить некоторое внимание физике времени. Наша задача будет заключаться не только в том, чтобы понять важнейшие принципы природы времени, которые раскрывает физика, но также найти точки пересечения – или, точнее, *столкновения* – идей физики и нейробиологии (главы 8 и 9). Чтобы продвинуться в этом направлении, необходимо вспомнить две важнейшие философские теории, касающиеся природы времени: *презентизм* и *этернализм*¹⁴.

Как следует из названия, в рамках теории презентизма утверждается, что реально только настоящее. В таком случае прошлое – это конфигурация вселенной, существовавшая в какой-то момент, а будущее – некая конфигурация, которую предстоит определить. Напротив, этернализм постулирует, что прошлое и будущее реальны в той же степени, что и настоящее. В настоящем нет ничего особенного: в рамках этернализма «сейчас» имеет для категории времени такой же смысл, как «здесь» для категории пространства. В настоящий момент вы находитесь в каком-то одном конкретном месте в пространстве, но вы прекрасно знаете, что существует множество других, столь же реальных, мест – комнат, городов, планет и галактик. Аналогич-

¹¹ Kandel et al., 2013. Вы также не найдете слова *timing* (распределение времени), хотя найдете слово *temporal*, которое, впрочем, в большинстве случаев относится к *temporal lobe* (височной доле мозга), поскольку это слово имеет двойной смысл: во-первых, это прилагательное от слова *temple* (висок), во-вторых, производное от слова *time* (время). Из-за этой путаницы некоторые люди считают, что наша способность определять время локализована в височной доле мозга. Заметьте, что я привожу этот пример не для того, чтобы указать на упущения автора учебника, но как доказательство явного недостатка внимания к вопросам времени в нейробиологии в целом.

¹² Ivry and Schlerf, 2008.

¹³ Dudai and Carruthers, 2005; Tulving, 2005; Schacter and Addis, 2007; Schacter et al., 2007.

¹⁴ От англ. *present* – настоящее и *eternal* – вечное. – Прим. ред.

ным образом, даже если вы ощущаете себя в некоей временной точке, называемой «сейчас», существуют другие – прошлые и будущие – моменты времени, где находятся другие существа, а также *вы сами* – более молодой и более старый (рис. 1.2).

Возможно, объяснить разницу между этими двумя концепциями проще всего на примере путешествий во времени¹⁵. В рамках презентизма истинное путешествие во времени (перемещение назад и вперед, в прошлое и в будущее) невозможно. Такие технические детали, как возможность построения машины времени в рамках законов физики, просто не имеют смысла, поскольку нельзя перенестись в несуществующее время, как нельзя перенестись в несуществующее место. В рамках этернализма ось времени отчасти (но не полностью) аналогична пространственным осям, так что вселенная представляет собой четырехмерный «блок», в котором прошлое и будущее так же реальны, как север и юг по отношению к нашему местоположению в пространстве. Хотя сам этернализм не зависит от того, являются ли перемещения во времени возможными, сама постановка вопроса невозможной не является, поскольку на оси времени имеются «места» (моменты), в которые можно стремиться попасть.

¹⁵ Большинство физиков и философов соглашаются с тем, что создание машины времени станет серьезным аргументом против презентизма. В данном контексте я в основном хочу подчеркнуть, что путешествия во времени (точнее, замкнутые кривые времени в системе пространство-время) несовместимы с той формулировкой концепции презентизма, которую я использую. Однако есть неочевидные случаи. Например, можно утверждать, что замкнутое время, в котором настоящее замыкается петлей само на себя, совместимо и с концепцией презентизма, и с некоторой формой путешествия в прошлое (однако, вообще говоря, под путешествием во времени мы подразумеваем не это). Но в целом, как подчеркивал философ Майкл Локвуд, «Путешествие во времени и общепринятый взгляд на время... просто не совмещаются. Сама идея путешествий во времени имеет смысл только в контексте безвременного подхода» (Lockwood, 2005). Обратите внимание, что Локвуд использует термины *временной* (tensed) и *безвременной* (tensless или untensed) в том же смысле, как я использую термины *презентизм* и *этернализм*.

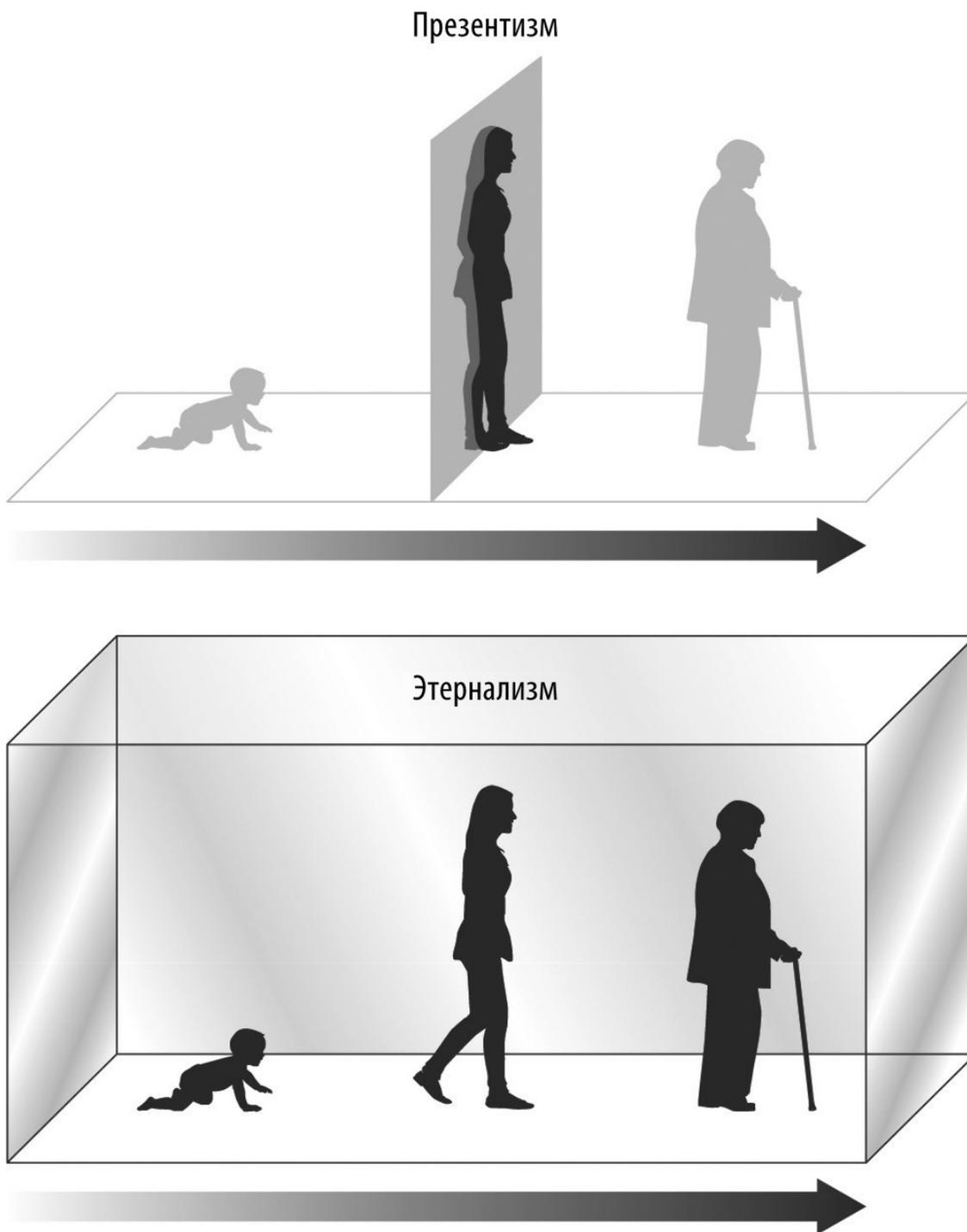


Рис. 1.2. Две концепции природы времени: презентизм и этернализм

Постулаты презентизма совпадают с нашим интуитивным представлением о том, что каждый момент нашей жизни, переходящий в прошлое, просто исчезает. Вне зависимости от того, сохраняется ли этот момент в нашей памяти или нет, сам момент прекращает существование. Презентизм также подкрепляет наше ощущение контроля над ситуацией: наши решения и поступки формируют будущее. Нейробиологи редко сопоставляют теории презентизма и этернализма, но на практике они являются презентистами. В прошлом, настоящем и будущем они видят совершенно разные категории: мозг принимает решения в настоящем, основываясь на воспоминаниях о прошлом, чтобы создать благоприятную ситуацию в будущем. Однако,

несмотря на привлекательность для нас на интуитивном уровне, в физике и философии презентизм – неудачная теория.

Некоторые версии этернализма уходят корнями в прошлое как минимум на два с половиной тысячелетия – к греческому философу Пармениду, который считал, что мы живем в вечном мире, в котором не происходит никаких изменений. Сегодня, по вполне разумным причинам, большинство физиков и философов принимают этерналистский тезис о том, что все моменты времени в некотором смысле «уже» включены в некий «блок вселенной». И представление о времени как о четвертом измерении – не просто удобная математическая абстракция, как ось времени на графике, но прошлое, настоящее и будущее действительно существуют на равных основаниях.

В этом-то и заключается камень преткновения между физикой и нейробиологией: если все моменты времени одинаково реальны, и все события прошлого и будущего навсегда вписаны в «блок вселенной», наше ощущение *течения времени* оказывается иллюзией (глава 9). Другими словами, если все моменты времени «уже есть», время не может *идти* или *протекать* в обычном смысле этих слов. Философ Джек Сمارт однажды заметил: «Ход времени или опережающее сознание – опасные метафоры, которые нельзя воспринимать буквально»¹⁶. Так что одно из самых очевидных и универсальных субъективных ощущений, а именно, ощущение хода времени, следует воспринимать как некую проделку сознания. Вообще говоря, это широко распространенная точка зрения. Например, философ Хью Прайс в книге «Стрела времени и точка Архимеда» пишет: «По этому вопросу философы всегда разделялись на два лагеря. На одной стороне те, кто считают поток времени и настоящее объективной реальностью мира [презентизм]; на другой – те, кто утверждают, что это лишь артефакты нашего субъективного восприятия мира [этернализм]... Лично я отношусь ко вторым».

Математик и физик Герман Вейль подметил несоответствие между нашим восприятием времени и моделью «блока вселенной», высказав ставшую знаменитой фразу: «Объективный мир просто есть, он не случается. Лишь для взора моего сознания, карабкающегося по мировой линии жизни моего тела, порождается часть мира как образ, плывущий в пространстве и непрерывно меняющийся во времени»^{17 18}.

МНОЖЕСТВЕННОСТЬ ВРЕМЕНИ

Обсуждение проблемы времени, будь то в рамках нейробиологии, философии или физики, неизбежно затрудняется еще и тем, что слово «время» используется для обозначения множества разных вещей. Одна из причин, почему это слово является наиболее часто употребляемым словом английского языка, как раз и связана со множественностью его смыслов. Использование слова «время» различно в разных языках. По-английски мы говорим, что скорость – это *расстояние, поделенное на время*, и задаем вопрос: *сколько сейчас времени?* А у португальцев для этих случаев есть два разных слова. В определении скорости фигурирует слово *tempo*, но вопрос звучит иначе: *que horas são* (который сейчас час)? Однако, в отличие от англичан, португальцы используют слово *tempo* еще и для обозначения погоды.

В повседневной жизни мы без труда используем слово «время» в самых разных значениях, однако эта легкость обращения скрывает сложность данного понятия. Поэтому будет бесполезно если не определить, то хотя бы разграничить различные смыслы этого слова.

¹⁶ Цитируется в соответствии с книгой Davies, 1995, 253. См. также Smart, 1964.

¹⁷ Перевод В. Краснянской и М. Томс. – *Прим. перев.*

¹⁸ Weyl, 1949/2009.

Давайте разберем такое предложение: «Доклад Минковского¹⁹ о природе времени закончился вовремя, но казалось, что он продолжался много времени».

В этом немного неестественном предложении слово «время» использовано в трех разных смыслах, которые важны для нашего рассказа. В порядке появления в предложении они соответствуют *естественному времени*, *часовому времени* и *субъективному времени*.

Интуитивно мы воспринимаем время как некую среду, в которой протекает наша жизнь. Для обозначения времени в качестве этой среды или «измерения» я использую термин «естественное время». Именно естественное время находится в центре спора между сторонниками презентизма и этернализма. На практике большинство ученых не интересуются проблемами естественного времени, но, вообще говоря, что может волновать нас сильнее, чем возможность существования других «версий» нас самих на временной оси «блока вселенной» или реальность (или иллюзорность) нашего ощущения течения времени?

На практике под *временем* иногда понимают *показания часов*. Это определение может показаться бессмысленным тождеством, но оно чрезвычайно важно. Однако оно неизбежно поднимает другой вопрос: *что такое часы?* В самом общем смысле часы – это устройство, которое воспроизводимым образом подвергается определенным изменениям и позволяет на количественном уровне измерить эти изменения. Изменения могут выражаться в движении маятника, вибрации кристалла кварца или даже соотношении радиоактивных изотопов углерода в окаменелостях. Чаще всего в научных сферах под *временем* понимают именно *часовое время*. Впрочем, Эйнштейн подчеркивал, что «подобное определение приемлемо только тогда, когда мы говорим о времени в той точке, где находится наблюдатель; но оно неприемлемо, если нужно сопоставить по времени события, происходящие в разных местах»²⁰. *Часовое время* – локальная мера изменений, но ни в коем случае не абсолютная и не универсальная. И, тем не менее, именно часовое время управляет нашей жизнью: оно не только подсказывает нам, когда нужно вставать, идти на работу и ложиться спать, но, поскольку само тело тоже представляет собой часы, часовое время определяет момент нашего старения и ухода.

Субъективное время описывает наше подсознательное ощущение времени: как ощущение хода времени, так и ощущение *количества времени*. Как любой субъективный опыт, субъективное время – порождение мозговой деятельности. И оно не существует за пределами человеческого черепа. Аналогично тому, как наше субъективное восприятие цвета позволяет нам изучать физические свойства видимого света (света с разной длиной волны), наше субъективное восприятие времени – это продукт деятельности головного мозга, который в каком-то смысле позволяет нам «чувствовать» как *естественное*, так и *часовое время*.

Философы и ученые на протяжении тысячелетий ломали головы над тайной времени. И до сих пор, спустя 1600 лет после того, как Блаженный Августин рассуждал о сложностях определения времени, мы все еще не знаем ответа на такие важнейшие вопросы, как равноценность реальности прошлого, настоящего и будущего или иллюзорность нашего ощущения хода времени.

Чтобы найти ответы на эти вопросы, нейробиология должна еще созреть и принять тот факт, что понимание устройства человеческого мозга невозможно без описания того, как мозг определяет, воспринимает и отражает время. Дело в том, что, как я покажу в следующей главе, мозг представляет собой машину времени, которая не только определяет время и предска-

¹⁹ Герман Минковский (1864–1909) – немецкий математик, предложивший модель единого четырехмерного пространства-времени. – *Прим. ред.*

²⁰ Einstein, 1905.

вает будущее, но и позволяет нам мысленно перемещаться в будущее. Часто мы оставляем без внимания тот факт, что без способности мысленного путешествия в будущее наш вид никогда не смог бы изготовить из вулканического стекла орудия труда или понять, что посев зерна сегодня обеспечит выживание завтра.

Однако наша уникальная способность воспринимать концепцию времени и вглядываться в отдаленное будущее является одновременно и даром, и наказанием. В ходе эволюции мы перестали следовать за непредсказуемыми капризами матери-природы и начали управлять ею: мы научились манипулировать настоящим, чтобы обеспечить себе выживание в будущем. Однако способность предвидения неизбежно привела нас к пониманию конечности и быстротечности собственной жизни. Получив этот великий дар или великое наказание, мы стоим перед удивительной тайной: *Что же такое время?*

2:00

ЛУЧШАЯ НА СВЕТЕ МАШИНА ВРЕМЕНИ

Каждое реальное тело должно обладать четырьмя измерениями: оно должно иметь длину, ширину, высоту и продолжительность существования. Но вследствие прирожденной ограниченности нашего ума мы не замечаем этого факта. И все же существуют четыре измерения, из которых три мы называем пространственными, а четвертое – временным²¹.

ГЕРБЕРТ УЭЛЛС, 1895

С идеей о путешествиях во времени нас познакомил Голливуд. «Терминатор», «День сурка», «Назад в будущее», «Жена путешественника во времени», «Петля времени», «Полночь в Париже», «Интерстеллар» и многие серии «Звездного пути» – лишь некоторые примеры из длинного списка фильмов, в которых мы сталкиваемся с парадоксами, возникающими в результате игр со временем, таких как убийство собственных предков при перемещении в прошлое.

Однако, несмотря на популярность этой темы в мире современного кино, телевидения, литературы и даже в серьезных физических исследованиях, концепция путешествий во времени не существовала на протяжении большей части истории человечества. В Библии и других религиозных книгах и устных преданиях есть множество историй о говорящих животных, божествах и других сверхъестественных вещах. Там есть рассказы о превращении животных в человека и человека в животных, о путешествиях в космическом пространстве, о людях вроде Мафусаила, проживших несколько столетий, о волшебстве и воскрешении. Но, что странно, ничего или почти ничего о путешествиях во времени. Даже Шекспир, который, кажется, предвосхитил практически все трюки современного кинематографа, никогда не касался темы путешествий во времени.

На этом фоне есть лишь несколько исключений. Например, в древнеиндийской поэме «Махабхарата», созданной в 800-х гг. до н.э., рассказывается о царе и его дочери, которые отправились к богу Брахме, чтобы найти достойного жениха. Позднее они узнают, что за время их отсутствия на Земле сменилось несколько поколений, и исчезли все царские сокровища. В новелле «Рип ван Винкль»²² говорится о том, что время может идти с разной скоростью, но там не происходит перемещений вперед и назад во времени. Предшественником историй о перемещении во времени можно считать повесть Чарльза Диккенса «Рождественская песнь», написанную в середине XIX в. Духи переносят героя рассказа Эбинейзера Скруджа в рождественские дни прошлого и будущего, однако эти путешествия совершаются пассивно, как бы во сне, и персонажи из разных эпох не общаются между собой. И лишь в конце XIX в. появилась идея «истинного» путешествия во времени, в частности, в повести Г. Уэллса «Машина времени», герой которой отправляется в будущее, встречается с выродившимися потомками человеческой расы и возвращается в свое время²³.

Почему идея перемещений во времени не появлялась в фантастической литературе до конца XIX в.? Возможно, по той причине, что человеческие существа по своей природе явля-

²¹ Перевод К. Морозовой.

²² Фантастический рассказ американского писателя Вашингтона Ирвинга, написанный в 1819 году. – *Прим. перев.*

²³ Кажется, до «Машины времени» было написано три книги о путешествиях во времени, включая новеллу «El Apasnoñete» испанского писателя Энрике Гаспара. Я должен подчеркнуть, что мои познания в литературе весьма ограничены, и я, безусловно, знаю далеко не все литературные произведения о путешествиях во времени. Поэтому, вполне вероятно, что эта тема находила отражение в литературе и до конца XIX в.

ются презентистами: для нас совершенно очевидно, что прошлое ушло и поэтому не может измениться, а будущее еще не существует. Возможно, идея о том, что прошлое и будущее так же реальны, как настоящее, и поэтому являются возможным направлением для путешествия, слишком сильно противоречит интуиции и слишком фантастична даже для фантастической литературы. Так что же изменилось в конце XIX в., что позволило нам совершать воображаемые путешествия во времени? Однозначно ответить на этот вопрос сложно, но, совершенно очевидно, какую-то роль сыграла научная революция.

Кульминацией этой революции была публикация в 1905 г. специальной теории относительности Эйнштейна, которая навсегда изменила наше представление о природе времени. Эйнштейн показал, что при разной скорости перемещения часов они тикают с разной скоростью. Через два года после этого учитель Эйнштейна Герман Минковский показал, что теория Эйнштейна вполне совместима с концепцией четырехмерного пространства, т. е. пространства, в котором есть еще одно измерение – время.

Об открытиях в физике, способствовавших принятию модели четырехмерной вселенной, мы поговорим в главе 9, а сейчас только отметим, что в XX в. в среде физиков постепенно стало возможным поднимать вопрос о путешествиях во времени. Не потому, что большинство физиков поверили в реальную возможность перемещений в прошлое или будущее, но потому что никто не мог доказать, что такой возможности не существует. Многие физики соглашались, что, в принципе, на шкале времени есть «места», куда можно попасть, но при этом считают, что по практическим или теоретическим причинам законы физики не позволяют осуществлять эти перемещения²⁴. Дело в том, что для перемещений во времени должны выполняться весьма специфические требования. Наименее неправдоподобным способом таких перемещений, наверное, является перемещение по пространственно-временному туннелю («кротовой норе»). Представьте себе поверхность Земли как слой пространства и времени, а затем вообразите туннель, ведущий напрямую от Вашингтона до Пекина. Идея пространственно-временных туннелей не противоречит современным законам физики, но пока остается гипотетической. Для путешествий во времени не только потребуются создать или найти такой туннель, но и двигать один выход относительно другого с очень большой скоростью. А дальше остается надеяться, что такой туннель стабилен и проходим, т. е. входящий в него не подвергнется – используя научный термин – спагеттификации²⁵.

Но я отвлекся, поскольку в этой главе я не планировал обсуждать возможность или невозможность реальных путешествий во времени, а хотел убедить вас в том, что лучшей машиной времени для каждого из нас является собственный мозг. Или, иными словами, каждый из нас – лучшая на свете машина времени.

МОЗГ – ЭТО МАШИНА ВРЕМЕНИ

Конечно, мозг не позволяет нам перемещаться во времени физически, но это все же своего рода машина времени по четырем взаимосвязанным причинам.

1. Головной мозг – это машина, которая запоминает прошлое, чтобы предсказать будущее. На протяжении сотен миллионов лет животные соревновались в развитии способности предсказывать будущее. Животные предвидят поведение жертвы, хищников и потенциальных половых партнеров; они готовятся к будущему путем запасания еды и строительства

²⁴ Даже если прошлое и будущее столь же реальны, как настоящее, и законы физики априори не запрещают перемещений во времени, они все же могут делать невозможным практическое воплощение таких перемещений: Стивен Хокинг называл это ограничение «защищенностью хронологии». О возможности перемещений во времени и физике этих перемещений написано множество превосходных научно-популярных книг, в том числе: Davies, 1995; Thorne, 1995; Carroll, 2010; Davies, 2012.

²⁵ Спагеттификация (или эффект лапши) – растяжение объектов в сильном неоднородном гравитационном поле. – *Прим. перев.*

гнезд; они предчувствуют закат и восход, зиму и весну. Успешность предсказаний будущего определяет важнейшие факторы эволюции – выживаемость и воспроизводство. Таким образом, мозг, по сути, представляет собой аппарат для предсказаний и предвидения²⁶. Осознаете вы это или нет, но в каждый момент времени ваш мозг автоматически пытается предсказать, что должно произойти. Эти краткосрочные предсказания, примерно на следующие несколько секунд, делаются совершенно автоматически и бессознательно. Если со стола скатывается резиновый мячик, мы автоматически выполняем движение, чтобы поймать его, когда он отскочит от пола, но реагируем совсем по-другому, если со стола падает кусок пирога.

Кроме того, человек и другие животные постоянно пытаются делать предсказания на более отдаленный период. Даже просто осмотр территории представляет собой попытку представить себе, что произойдет через несколько минут или часов. Когда волк останавливается, чтобы уловить какие-то знаки, звуки и запахи, он ищет подсказки, которые помогут обнаружить потенциальных врагов, жертв или партнера. Чтобы предсказывать будущее, мозг хранит колоссальный объем информации о прошлом; и, как программа резервного копирования Time Machine для Apple, он иногда присваивает этим воспоминаниям временные этикетки (даты), что позволяет воспринимать эпизоды из нашей жизни в хронологическом порядке.

2. Мозг – это машина, которая определяет время. Человеческий мозг осуществляет множество вычислений, в том числе такие, которые необходимы для узнавания лиц или выполнения следующего хода в игре в шахматы. Определение времени – еще одна вычислительная задача мозга: он не просто отсчитывает секунды, часы и дни нашей жизни, но распознает и создает временные образы, такие как музыкальные ритмы или точные последовательности движений, позволяющие гимнастам выполнять акробатические трюки.

Умение определять время – важнейшая способность, необходимая для предсказаний будущего. Как знают все метеорологи, мало сообщить, что дождь будет: нужно сообщить, *когда* он будет. Когда кот подпрыгивает вверх, чтобы схватить пролетающую птицу, он должен знать, где птица окажется через секунду. Птицы-опылители, в свою очередь, умеют отмерять отрезок времени, прошедший с момента их последнего визита на конкретный цветок, чтобы к следующему разу цветок вновь успел наполниться нектаром²⁷. Буквально все проявления жизни – от способности метнуть копье в движущуюся мишень, понять, когда смеяться в конце анекдота, или сыграть «Лунную сонату» Бетховена, до умения регулировать суточный цикл сна и бодрствования или месячный менструальный цикл – требуют умения определять время.

3. Мозг – это машина, создающая ощущение времени. В отличие от зрения и слуха, ощущение времени не обеспечивается каким-то определенным органом чувств. Время не является формой энергии или неотъемлемым свойством материи, которое можно проанализировать с помощью физических измерений. Однако примерно тем же путем, как мы осознанно определяем цвет предметов (длину волны отраженного электромагнитного излучения), мы воспринимаем и течение времени. Это ощущение течения времени создает мозг. Подобно большинству субъективных ощущений, наше чувство времени подвержено влиянию иллюзий и искажений. Период одной и той же длительности (измеренный с помощью внешних часов) может казаться мгновением или вечностью в зависимости от целого ряда факторов. Но с искажениями или без искажений осознанное чувство течения времени и изменения окружающего мира относится к числу наиболее обычных и очевидных наших ощущений. И вот это-то ощущение течения времени никак не согласуется с представлением о времени, широко распространенным в среде физиков и философов.

4. Мозг позволяет совершать мысленные путешествия во времени. Соревнования по предсказанию будущего были легко выиграны нашими предками гомининами, когда

²⁶ Dennett, 1991, 177; Clark, 2013.

²⁷ Henderson et al., 2006.

они постигли концепцию времени и научились мысленно переносить себя в прошлое и в будущее, т. е. научились *мысленно путешествовать во времени* (глава 11). Аврааму Линкольну приписывают следующую фразу: «Лучший способ предсказать будущее заключается в том, чтобы его создать». Именно это мы и научились делать благодаря способности мысленно перемещаться во времени. Мы изменили свой способ существования, перейдя от предугадывания капризов природы к созданию будущего путем ее порабощения.

Вот что писал известный канадский психолог Эндель Тульвинг: «Ранние проявления ориентированного в будущее мышления и планирования заключались в обучении использованию, поддержанию, а позднее и извлечению огня, в изготовлении орудий и их хранении. Снабжать покойников необходимыми [для загробной жизни] предметами, выращивать злаки, фрукты и овощи, приручать животных для получения пищи и изготовления одежды ... – все это сравнительно новые этапы в эволюции человека. Все они подсказывались заботой о будущем»²⁸.

Каждый из нас переживал радость или горе при воспоминаниях о событиях прошлого и пытался представить себе, что было бы, если бы события разворачивались иначе. Но мы также постоянно перескакиваем в будущее, страшаясь того, что может произойти, или мечтая об этом, и моделируем различные варианты развития нашей жизни в будущем, рассчитывая найти наилучший вариант действий в настоящем. Может быть, человек – не единственное существо на планете, совершающее мысленные путешествия во времени, но он, безусловно, единственное животное, которое использует эту способность для поиска способов реальных перемещений в прошлое или будущее.

ВРЕМЯ – УЧИТЕЛЬ

Шотландский философ XVIII в. Дэвид Юм размышлял над тем, как человек воспринимает мир – как он представляет себе связь между событиями, происходящими в разных точках пространства и в разные моменты времени. Юм сформулировал три принципа, на которых строится понимание связи между событиями: *сходство* (предметов или событий), *смежность* (близость) во времени и пространстве и *причинность*. Кроме того, он предложил несколько правил, на основании которых можно установить наличие причинно-следственных связей между двумя событиями:

1. Причина и следствие должны быть смежными во времени и в пространстве.
2. Причина должна иметь место раньше следствия²⁹.

К счастью, не нужно читать Юма, чтобы понять эти правила, поскольку они вписаны в наш мозг на уровне нейронов и синапсов. Временные связи между событиями относятся к числу наиболее важных ключей, которые мозг использует для нахождения смысла в том, что Уильям Джеймс назвал «наплывом, шумом и беспорядком» сенсорной информации, осаждающей наши органы чувств. Как ребенок усваивает, что слово «кошка» относится к пушистому четвероногому существу с острыми когтями? Дело в том, что первые десятки раз, когда ребенок видит кошку, родители сюсюкают: «Посмотри на маленькую кошечку!» Другими словами, временная близость между двумя событиями – появлением кошки и произнесением слова «кошка» – позволяет нейронной сети ребенка связать эти два специфических стимула.

Одна из наиболее универсальных форм обучения в царстве животных – классический условный рефлекс – учитывает важнейшую роль временной обусловленности и порядка событий для функционирования мозга. Собака Павлова – стандартный пример формирования классического условного рефлекса: перед появлением мяса (безусловный стимул) звенит колокольчик (условный стимул), и собака в конечном итоге начинает выделять слюну просто при звуке

²⁸ Tulving, 2005.

²⁹ Hume, 1739/2000, 116.

колокольчика. Возможно, вам ближе другой пример: если вы открываете банку с кормом для кошки с помощью открывалки, вы наверняка наблюдаете материализацию кошки на кухне каждый раз, когда пользуетесь открывалкой. Хотя колокольчик, на самом деле, не является *причиной* появления еды, с точки зрения собаки это возможно.

ПО-ВИДИМОМУ, ЖИВОТНЫЕ НЕ СПОСОБНЫ НАХОДИТЬ СВЯЗЬ МЕЖДУ СОБЫТИЯМИ, РАЗДЕЛЕННЫМИ ИНТЕРВАЛАМИ В НЕСКОЛЬКО МИНУТ ИЛИ ЧАСОВ, НЕ ГОВОРЯ УЖЕ О ДНЯХ ИЛИ МЕСЯЦАХ. ЧЕМ БОЛЬШЕ ИНТЕРВАЛ МЕЖДУ СОБЫТИЯМИ, ТЕМ ТРУДНЕЕ ОБНАРУЖИТЬ СВЯЗЬ.

Юм, наверное, даже не мог предположить, насколько временная обусловленность важна для работы мозга. Давайте представим себе, какую задачу должен решить мозг ребенка, чтобы узнать лицо матери. Иногда ее лицо появляется совсем близко, и тогда оно большое, но иногда ребенок видит мать на некотором расстоянии, и тогда лицо маленькое. Каждый раз на сетчатке проецируется совершенно новое изображение (подобно тому, как при фотографировании одного и того же человека с разных расстояний в аппарате активируются разные наборы пикселей, так и в сетчатке активируется разный набор фоторецепторов). Но как же ребенок понимает, что все эти разные образы соответствуют его маме?

Эта проблема так называемой *инвариантности восприятия* достаточно сложна, но в соответствии с одной теорией она решается с помощью принципа временной обусловленности. У ребенка есть опыт восприятия увеличивающегося и уменьшающегося образа матери, возникающего при ее приближении и удалении. Если мозг понимает, что запечатленные на сетчатке различающиеся образы, связанные временной близостью, поступают от одного и того же предмета, и он в конце концов усвоит общий принцип инвариантности восприятия размера: эти возникающие одно за другим изображения соответствуют одному и тому же объекту из внешнего мира³⁰. Иными словами, если бы не существовало такой временной близости – допустим, мы бы росли в стробоскопическом мире, где мимолетные изображения мгновенно сменялись бы в необычном порядке от больших до маленьких – возможно, мы бы не обладали способностью распознавать один и тот же предмет, увиденный с разных расстояний, как единую сущность. Классический условный рефлекс и многие другие формы обучения учитывают асимметрию временных связей, определяемую вторым правилом Юма: причина предшествует следствию. Если Павлов давал собаке мясо до того, как звенел колокольчик, условный рефлекс не формировался. Аналогичным образом, классический условный рефлекс чрезвычайно чувствителен к степени временной близости, точнее, к интервалу между событиями. Если Павлов выдавал мясо через час после звонка, собака не чувствовала связи между звуком и появлением еды, хотя колокольчик по-прежнему предсказывал появление еды. По-видимому, животные не способны находить связь между событиями, разделенными интервалами в несколько минут или часов, не говоря уже о днях или месяцах³¹. Чем больше интервал между событиями, тем труднее обнаружить связь. Формирование условного рефлекса – самая «примитивная» форма обучения.

Для осознания связи между событиями, разделенными во времени сутками, месяцами и годами, требуются более совершенные умственные способности. Понимание концепции времени и умение осуществлять мысленные перемещения во времени позволяют человеку видеть связь между занятиями любовью и рождением ребенка или посевом семян и появлением растений. Но и мы достаточно близоруки в этом отношении: если бы рак появлялся через неделю

³⁰ Földiák, 1991; Wiskott and Sejnowski, 2002; DiCarlo and Cox, 2007.

³¹ При обсуждении классического условного рефлекса следует упомянуть одно исключение. У людей и других животных может возникнуть отвращение к пище, если после еды – даже спустя много часов – они заболевают (Буономано, 2011).

после выкуривания первой сигареты, а не через несколько десятилетий, табачная промышленность никогда не заработала бы триллионов долларов (глава 11).

«ПРАВИЛЬНЫЙ» И «НЕПРАВИЛЬНЫЙ» ПОРЯДОК СОБЫТИЙ

Процесс познания в очень большой степени зависит от понимания временных связей между переживаемыми нами событиями. Как заметил психолог Стивен Пинкер, мы обычно считаем само собой разумеющимся, что порядок перечисления событий соответствует порядку их совершения. Например: *Они поженились и родили ребенка*. Но кто сказал, что события разворачивались именно в этом порядке? В большинстве языков уловить связь между событиями гораздо легче, если они перечислены именно в том порядке, в котором совершились³². Так, намного проще перевернуть предложение «*Она улыбнулась, прежде чем развернуть подарок*», чем «*Прежде чем развернуть подарок, она улыбнулась*».

Предположения мозга относительно хронологии событий и временных интервалов между ними позволяют нам предвидеть происходящие вокруг нас события, однако эти предположения могут быть ошибочными. Представьте себе фокусника, который берет со стола монету правой рукой, затем с воодушевлением хлопает в ладоши, произносит заветное слово «абра-кадабра» и, наконец, демонстрирует зрителям, что монеты нет ни в одной, ни в другой руке. Этот фокус основан на неправильном восприятии нами хронологии событий³³. Исчезновение монеты мы автоматически связываем с наиболее близкими по времени событиями – хлопком и *абракадаброй*. На самом деле, конечно же, в это время монеты в руках уже нет, и весь ловкий трюк состоит в том, чтобы незаметно сбросить монету со стола в тот момент, когда фокусник делает вид, что сжимает ее в руке. Чем больше интервал между двумя событиями, тем труднее обнаружить связь между ними. Разделяя во времени истинную причину исчезновения монеты и выявление ее исчезновения, фокусник использует особенность нашего мозга в отношении восприятия временных связей между событиями.

В книге «Тараканы в голове» я привел пример такого ошибочного восприятия событий из личного опыта, когда я впервые играл в «очко» в Лас-Вегасе. Как известно, суть игры заключается в том, чтобы сумма карт в руках игрока составила 21; если двух карт для этого мало, нужно решить, брать ли третью и при этом идти на риск «перебора» (когда сумма очков превышает 21). Вы играете против банкующего, который играет, как автомат, добирая дополнительные карты, пока сумма очков не составит 17 или более. Я предполагал, что если я буду действовать так же, как он, мой шанс на выигрыш будет составлять 50:50. Конечно, я знал, что казино всегда в выигрыше, но не понимал почему. Выясняется, что все очень просто: если «перебор» у нас обоих, выигрывает банкующий. Как я мог этого не понимать? Преимущество казино скрыто от нас из-за неправильного восприятия временных связей.

Вот как это происходит: поскольку я играю первым, как только у меня «перебор», банкующий немедленно забирает мои карты и деньги, давая понять, что для меня игра закончена. Дальше он продолжает круг с другими игроками и лишь потом открывает свои карты. В этот момент, если я все еще нахожусь за столом, я могу узнать, что у него тоже «перебор», и, значит, *никто не выиграл*. Я не мог обнаружить преимущество казино, поскольку оно скрыто в будущем: нормальная связь между причиной и следствием перевернута во времени. В том случае, когда у нас обоих «перебор», результат моего проигрыша наступает раньше причины: мои карты и деньги отбираются (результат) до того, как я узнаю, проиграл ли я или сыграл вничью с банкующим. Преимущество казино трудно обнаружить по той причине, что выбывший из

³² Pinker, 2014.

³³ Fraps, 2014.

игры игрок прекращает следить за дальнейшим развитием событий. Используя нашу недалекость, казино скрывает от нас, как обрабатывает результаты в свою пользу³⁴.

ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННЫЕ СВЯЗИ В СИНАПСАХ

Даже если мы живем в замороженном «блоке вселенной», где правят законы этернализма, и ход времени оказывается лишь иллюзией, хронология событий и длительность промежутков между ними влияют на формирование нашего мозга. Вообще говоря, сформулированные Юмом правила представляют собой алгоритмы, определяющие работу электрической схемы мозга. Например, временная асимметрия причины и следствия закодирована в мозге на самом базовом уровне.

Наш мозг – это сеть, состоящая примерно из 100 млрд нервных клеток, взаимодействующих между собой через сотни триллионов синапсов³⁵. Как и большинство элементов вычислительных машин, включая транзисторы в компьютере, нейроны получают входные сигналы и испускают выходные сигналы. Однако, в отличие от транзисторов, нейроны являются экстравертами. Рядовой транзистор в обычном компьютере связан с несколькими десятками других транзисторов, а рядовой нейрон связан с тысячами других нейронов. Эти связи осуществляются посредством синапсов – зон контакта между соседними нейронами: *пресинаптическим* нейроном, посылающим сигнал, и *постсинаптическим* нейроном, который его принимает. Входные сигналы для каждого нейрона складываются из сигналов его пресинаптических партнеров, отсылающих биоэлектрические импульсы. Возбуждающие синапсы заставляют постсинаптический нейрон «возбуждаться», т. е. отсылать электрический сигнал всем нижестоящим нейронам (своим постсинаптическим партнерам). Напротив, тормозные синапсы пытаются убедить постсинаптические нейроны хранить спокойствие. При таком гигантском количестве элементов электрическая схема мозга представляет собой невероятно сложную систему (рис. 2.1). Но от чего зависит, какие именно нейроны установят между собой связи?

ПРИ ТАКОМ ГИГАНТСКОМ КОЛИЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА МОЗГА ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ НЕВЕРОЯТНО СЛОЖНУЮ СИСТЕМУ. НО ОТ ЧЕГО ЗАВИСИТ, КАКИЕ ИМЕННО НЕЙРОНЫ УСТАНОВЯТ МЕЖДУ СОБОЙ СВЯЗИ?

³⁴ Существует некая асимметрия в пользу клиента. Если я получаю 21 очко, я сразу выигрываю, даже если у банкующего тоже 21 очко. Конечно, вероятность получить именно 21 очко меньше, чем получить любую большую сумму. Я уже писал об этом в предыдущей книге (Буономано, 2011).

³⁵ Beaulieu et al., 1992; Shepherd, 1998; Herculano-Houzel, 2009.

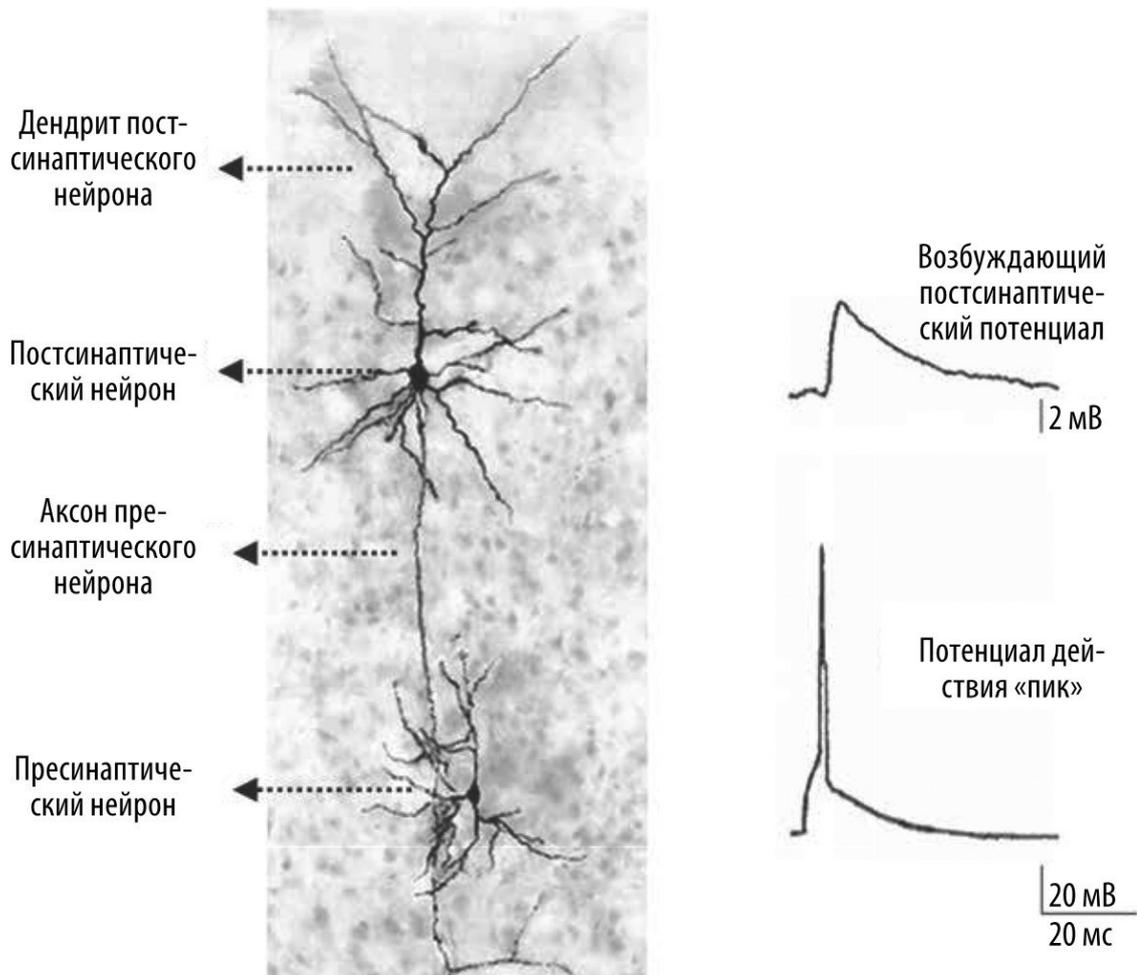


Рис. 2.1. Нейроны и синапсы. Изображение двух корковых нейронов. Аксон нижнего пресинаптического нейрона соединяется с дендритом верхнего постсинаптического нейрона через синапс (не виден). Потенциал действия – быстрый «всплеск» напряжения – в пресинаптическом нейроне вызывает небольшое увеличение напряжения постсинаптического нейрона (так называемый возбуждающий постсинаптический потенциал, EPSP). (Изменено с разрешения Feldmeyer et al., 2002)

В качестве очень упрощенной аналогии может служить интернет – еще один пример сети связанных между собой элементов. Представьте себе, что веб-страницы – это нейроны, а однонаправленные гиперссылки – синапсы. Связи между страницами в подавляющем числе случаев устанавливаются внешними законами, точнее, программистами. Но мозг возбуждается самостоятельно, у него нет никакого программиста. Кроме того, в отличие от интернета, для мозга важно не только наличие связи между элементами, но и сила («вес») каждого соединения. Вес синапса определяет степень влияния пресинаптического нейрона на поведение постсинаптического нейрона. Наличие сильного возбуждающего синапса между нейронами А и В означает, что возбуждение А с большой вероятностью вызовет возбуждение В, а если синапс между А и В очень слабый, В почти не обращает внимания на то, что ему велит сделать А. Порядок связывания нейронов и сила синапсов между ними отчасти определяется синаптическими алгоритмами (так называемыми *правилами обучения нейронных сетей*), записанными в наших генах. Таким образом, гены не кодируют силу синапсов, но определяют алгоритмы ее регуляции³⁶.

³⁶ Здесь я немного упрощаю ситуацию. В мозге есть несколько связей и синапсов, которые напрямую контролируются генами, однако, скорее всего, сила большинства синапсов коры определяется правилами синаптического обучения и опытом.

В частности, одно из правил обучения, описываемое так называемой *моделью пластичности, зависимой от времени импульса* (spike-timing-dependent plasticity, *STDP*), прекрасно иллюстрирует, как в наших синапсах зафиксирована временная асимметрия причины и следствия. Рассмотрим два нейрона, изображенные на рис. 2.2: нейрон А связан с нейроном В, а В, в свою очередь, с А. Таким образом, существуют два синапса: А→В и В→А. Можно сказать, что между этими нейронами существует *рекуррентная связь*: нейрон А подает входной сигнал на нейрон В и наоборот. Теперь давайте предположим, что действие каждого нейрона запускается различными событиями во внешнем мире. Допустим, обладателем нейронов является девочка по имени Зоя, и нейрон А возбуждается в ответ на звук «з», а нейрон В – в ответ на звук «о». Поэтому каждый раз, когда мама или папа произносят имя девочки, первым возбуждается нейрон А, а потом нейрон В, причем нейрон А возбуждается на 25 мс раньше, чем нейрон В. Задача правила обучения заключается в том, чтобы усилить или ослабить синапсы в зависимости от характера активности пре-синаптического и постсинаптического нейрона. В данном случае *STDP* будет усиливать синапс А→В и ослаблять синапс В→А. Нейробиологам понадобилось удивительно много времени, чтобы осознать это простое правило. Оно было доказательно продемонстрировано только в 1990-х гг.³⁷ Но его красота очевидна: это правило позволяет синапсам устанавливать причинно-следственную связь между нейронами. Если нейрон А возбуждается раньше нейрона В, он может вносить вклад в возбуждение В, и поэтому этот синапс усиливается. А вот синапс В→А не играет важной роли – как будто кто-то постоянно напоминает вам закрыть дверь после того, как вы ее уже закрыли – и поэтому ослабевает (и в конечном итоге может полностью исчезнуть).

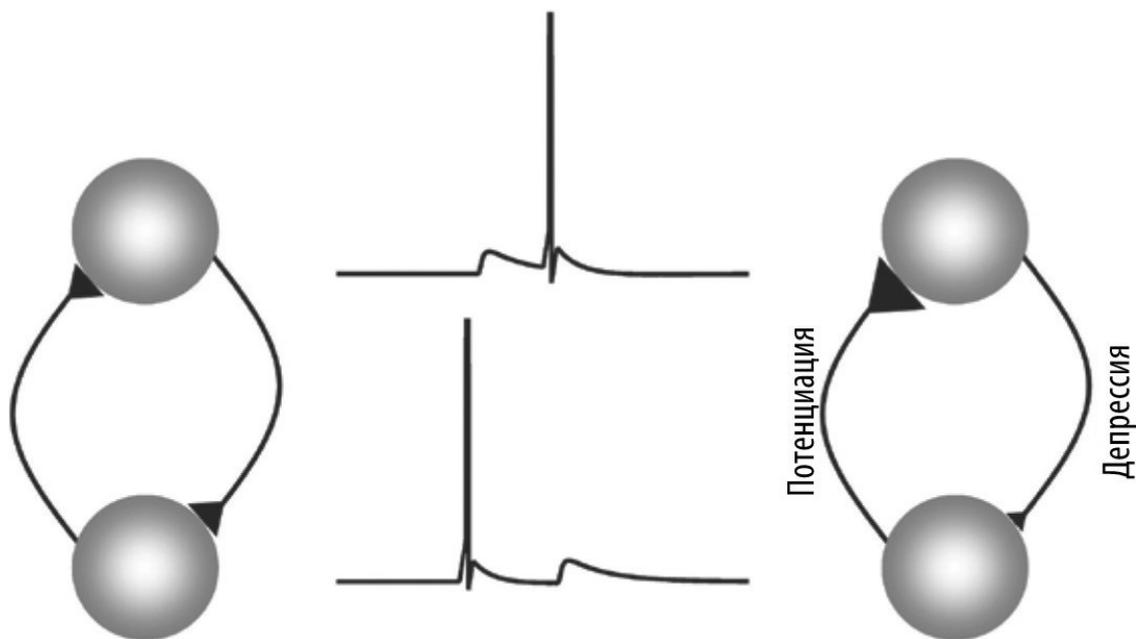


Рис. 2.2. Модель пластичности, зависимой от времени импульса (*STDP*). Два нейрона взаимосвязаны посредством двух синапсов (черные треугольники). Если нижний нейрон постоянно возбуждается раньше верхнего, синапс от нижнего нейрона к верхнему будет усиливаться (потенциация синаптической передачи), а синапс от верхнего нейрона к нижнему будет ослабевать (депрессия синаптической передачи).

³⁷ Вот несколько статей, в которых впервые описывалась модель пластичности, зависимой от времени импульса: Debanne et al., 1994; Markram et al., 1997; Bi and Poo, 1998. Однако в работах 1980-х гг. уже высказывались аналогичные идеи (Levy and Steward, 1983). На практике существует несколько версий правила *STDP*. Но в целом степень потенциации или депрессии в каждом конкретном случае может сильно изменяться, и обычно несимметричным образом: степень потенциации и депрессии различна при одинаковом абсолютном значении интервала (Abbott and Nelson, 2000; Karmarkar et al., 2002).

Считается, что способность синапсов обучаться причинно-следственным связям между нейронами отчасти определяет способность мозга обучаться связям между событиями внешнего мира. В нашем примере правило STDP помогает нейронам реагировать на последовательность звуков *з-о-я*, а не на редко произносимое *я-о-з*, и тем самым позволяет Зое узнавать свое имя. Но STDP – лишь одно из многих правил обучения в арсенале мозга. Заметим, что STDP использует тончайшее временное разрешение, доступное нервной системе: разница во времени поступления постсинаптических импульсов всего в несколько миллисекунд может определять, будет ли синапс усиливаться или ослабевать. Но этот механизм не учитывает связи между событиями, разделенными по времени на несколько секунд или более. Для решения такого рода задач требуются более сложные механизмы, основанные на действии не двух нейронов, а целых популяций нейронов. Однако тем или иным образом нейроны и синапсы мозга обучаются связывать между собой события, разделенные короткими и длинными промежутками, и позволяют нам осмысливать происходящее вокруг нас.

ОПРЕДЕЛЯЕМ ВРЕМЯ ПО РАЗНОЙ ВРЕМЕННОЙ ШКАЛЕ

Закройте глаза и сосредоточьте внимание на каком-нибудь внешнем звуке, например, на жужжании какого-то прибора. Вы легко можете определить, откуда идет звук – слева или справа. Как мозг находит в пространстве источник звука? Дело в том, что звук, идущий слева, сначала достигает левого уха, а чуть позднее – правого. Разница во времени поступления звука является функцией скорости звука и размера вашей головы. Для человека этот интервал составляет около 10 миллисекунд – в тысячу раз меньше, чем разрешающая способность хронометров, фиксирующих результат бега на стометровку на Олимпийских играх. Определенная зона мозга, отвечающая за обработку звуковых сигналов, измеряет этот интервал и на его основании вычисляет расположение источника звука. Поскольку скорость звука практически постоянна, эволюция развивалась так, что пространство и время для нас как бы комплементарны, поэтому вычисление времени позволяет нам «вычислять» пространство.

С совершенно удивительной точностью мы умеем определять время в чуть более широком диапазоне – от десятков миллисекунд до секунды. В этом диапазоне мы умеем не только оценивать интервал между двумя событиями, но также находить и интерпретировать сложные звуковые построения музыки или речи. Например, длительность слогов или пауз в речи позволяет вычислять границы слов (например, «Бра Тани» или «Брат Ани»). Длительность произношения слов и скорость речи определяют просодию (интонационную манеру) говорящего и характеризуют его эмоциональное состояние: сравните пассивную манеру речи человека с клиническими признаками депрессии и поток сознания возбужденного подростка. То же самое относится к музыке. Например, как указывают такие термины, как *grave* или *allegro*, медленный и быстрый темп музыки может использоваться для передачи скорби или веселья. Аналогично тому, как мы улавливаем человеческое лицо среди красочных пятен на полотнах Сера³⁸, так мы улавливаем суть музыки или речи на основании временных связей между их элементами. Если вы говорите очень-очень медленно, становится невозможным уловить суть речи, а если исполняете музыкальную пьесу слишком быстро, она перестает быть музыкой (глава 5).

МОЗГ – ЭТО ПРОДУКТ ЕСТЕСТВЕННОГО ОТБОРА И ПОЭТОМУ «СДЕЛАН» ТАК, ЧТОБЫ ЕГО ОБЛАДАТЕЛЬ МОГ ВЫЖИТЬ В ЖЕСТКОМ И БЕСКОНЕЧНО МЕНЯЮЩЕМСЯ МИРЕ. ВЫЯСНЯЕТСЯ, ЧТО ЛУЧШИЙ СПОСОБ ПРЕУСПЕТЬ В ЭТОМ МИРЕ – НАУЧИТЬСЯ ПРЕДУГАДЫВАТЬ,

³⁸ Жорж-Пьер Сера (1859–1891) – французский художник постимпрессионист. – *Прим. ред.*

ЧТО ПРОИЗОЙДЕТ В БУДУЩЕМ И КОГДА. ПОЭТОМУ МОЗГ – ЭТО МАШИНА, КОТОРАЯ И ПРЕДУГАДЫВАЕТ БУДУЩЕЕ, И ОПРЕДЕЛЯЕТ ВРЕМЯ.

Измерение времени – не то же самое, что осознание течения времени. Сознание работает слишком медленно, чтобы обнаруживать паузы между словами в реальном времени или выбрать момент, когда пора ловить падающий мяч. Но во временном диапазоне от нескольких секунд мы уже отдаем себе отчет не только в том, что время идет, но и в том, сколько именно времени прошло между теми или иными событиями. Мы осознанно можем предугадать, когда красный сигнал светофора сменится на зеленый. Мы понимаем, что телереклама вот-вот закончится, и возобновится спортивная передача. И мы буквально считаем секунды, пока человек в очереди перед нами не может решить, брать ли ему жареную картошку.

Мозг – это продукт естественного отбора и поэтому «сделан» так, чтобы его обладатель мог выжить в жестком и бесконечно меняющемся мире. Выясняется, что лучший способ преуспеть в этом мире – научиться предугадывать, что произойдет в будущем и когда. Поэтому мозг – это машина, которая и предугадывает будущее, и определяет время. Мозг отсчитывает время в диапазоне свыше 12 порядков величины – от минимального интервала времени, с которым звук доходит до левого и правого уха, до смены времен года.

Часы окружают нас со всех сторон: они у нас на запястье, в телефоне, в машине, в приборах, на стенах и в компьютерах. Но выясняется, что часы существуют не только снаружи, но и внутри нас. Головной мозг и тело человека и других животных умеют определять время: даже отдельная клетка печени может сообщить, какое сейчас время суток. Но как мозг определяет время? Какая часть мозга выполняет эту функцию? Теперь мы знаем, что на эти вопросы есть несколько ответов. Эволюция снабдила мозг множеством механизмов для определения времени. Этот подход (разные часы для разных временных интервалов), который я буду называть *принципом множественности часов*, отличается от нашего подхода к изготовлению часов. Даже самые простые наручные часы могут достаточно точно отсчитывать сотые доли секунды, секунды, минуты, часы, дни и месяцы. Но сети нейронов головного мозга, узнающие ритм Пятой симфонии Бетховена, не имеют часовой стрелки, как не имеют секундной стрелки сети нейронов, регулирующие циклы сна и бодрствования. Возможно, на первый взгляд это противоречит интуиции, но, учитывая важнейшую роль времени для всех аспектов поведения и познания, а также разный набор стоящих перед мозгом временных проблем, такой «множественности часов» как раз и следовало ожидать.

3:00 ДЕНЬ И НОЧЬ

Было бы неплохо, если бы мы смирились с фактом, что время – одна из тех вещей, которым мы, вероятно, не сможем дать определение... Действительно важно не то, как мы определяем время, а то, как мы его измеряем.

РИЧАРД ФЕЙНМАН

Одна из самых незначительных загадок науки заключается в том, *почему мыши любят крутить колесо*. Каждый владелец домашней крысы или мыши, также, как и любой человек, наблюдавший за этими животными в зоомагазине, наверняка видел, с каким энтузиазмом они бегают в колесе. Что заставляет их бежать? Маловероятно, что этим беднягам просто нечего делать. Люди рассказывают, что видели диких мышей, бегающих в старом колесе, брошенном в гараже, или лабораторных крыс, убежавших из клеток только для того, чтобы залезть на колесо. Эти забавные истории подкрепляются результатами экспериментов, в которых биологи расставляли крутящиеся колеса в местах естественного обитания грызунов и снимали происходящее скрытой камерой. Ученые наблюдали, как дикие мыши взбирались на колесо, спрыгивали с него, а потом залезали вновь³⁹. Как подростки, которые тратят с трудом заработанные деньги на игровые автоматы, так и грызуны готовы «поработать» за возможность побегать в колесе. А если к колесу прикрепляют тормоза, крысы нажимают на рычаг, чтобы отсоединить тормоза и разогнаться⁴⁰. У этого занятия есть даже темная сторона. Если крыс ограничивают в пище, бег в колесе может быть опасен для их здоровья. Находящиеся на диете крысы бегают в колесе гораздо активнее по сравнению с нормально питающимися крысами, не имеющими свободного доступа к колесу; в результате у них возникают дополнительные проблемы со здоровьем, и повышается уровень смертности⁴¹.

Сможем мы разгадать эту маленькую тайну или нет, но маниакальное желание мышей, крыс и хомяков побегать в колесе помогло нам сильно продвинуться в понимании того, как мозг определяет время, по крайней мере, время суток. Представленный на рис. 3.1 график называется актограммой⁴² и отражает движение мыши в колесе. Каждый раз, когда колесо совершает полный круг, прибор рисует вертикальную черточку. Для наглядности и во избежание промежутков на графике данные для следующего дня показаны справа и внизу по отношению к данным каждого текущего дня. Черно-белая полоска сверху отражает 24-часовой цикл с включенным и выключенным светом. Мыши и крысы – ночные животные, поэтому они предпочитают бегать в колесе ночью, но в лаборатории их «ночь» может быть нашим днем, т. к. биологи часто изменяют световой цикл животных, чтобы студентам не приходилось работать по ночам. Судя по графику, как только выключают свет, мыши забираются на колесо и начинают бегать, спрыгивая и вновь возвращаясь на протяжении всей ночи. Через несколько дней после начала эксперимента ученые полностью отключали свет. Но, как следует из графика, даже при отсутствии внешних сигналов относительно времени суток мыши продолжали следовать обычному суточному ритму со сменой активности и покоя. Однако в полной темноте происходило что-то интересное: длительность суточного цикла изменялась от привычных 24

³⁹ Meijer and Robbers, 2014.

⁴⁰ Pierce et al., 1986.

⁴¹ Routtenberg and Kuznesof, 1967; Morrow et al., 1997; Gutierrez, 2013.

⁴² Актограмма (от лат. actus – движение, и греч. gramma – запись) – графическая запись двигательной активности. – *Прим. ред.*

ч до чуть более короткого периода; это видно по постепенному сдвигу графика влево. Таким образом, по крайней мере у мышей, цикл сна и бодрствования не соответствует в точности 24 ч.

КАК ПОДРОСТКИ, КОТОРЫЕ ТРАТЯТ С ТРУДОМ ЗАРАБОТАННЫЕ ДЕНЬГИ НА ИГРОВЫЕ АВТОМАТЫ, ТАК И ГРЫЗУНЫ ГОТОВЫ «ПОРАБОТАТЬ» ЗА ВОЗМОЖНОСТЬ ПОБЕГАТЬ В КОЛЕСЕ. А ЕСЛИ К КОЛЕСУ ПРИКРЕПЛЯЮТ ТОРМОЗА, КРЫСЫ НАЖИМАЮТ НА РЫЧАГ, ЧТОБЫ ОТСОЕДИНИТЬ ТОРМОЗА И РАЗОГНАТЬСЯ.

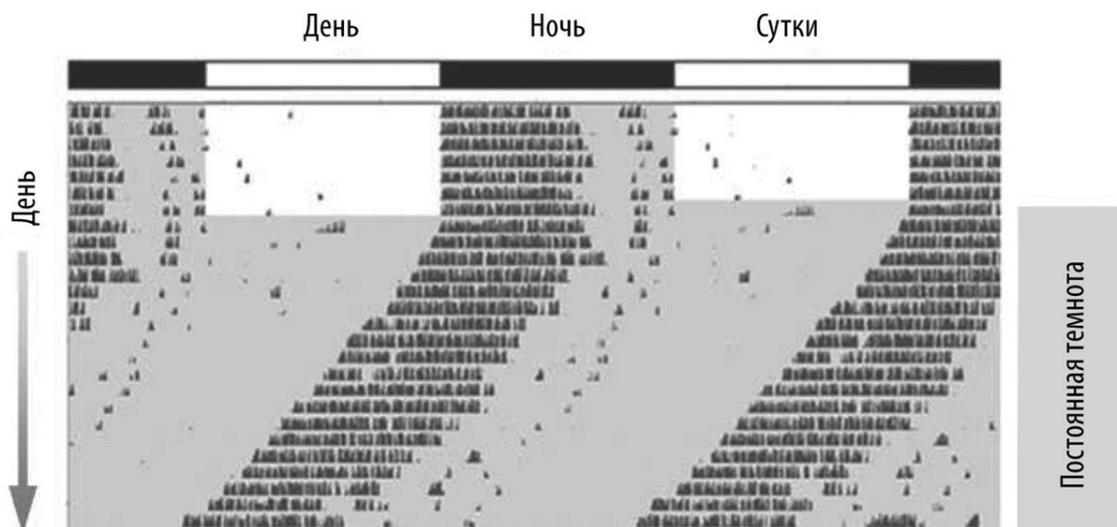


Рис. 3.1. Актограмма движения мыши в колесе. Ночная активность мыши отражается в виде вертикальных черных штрихов, соответствующих полному обороту колеса. Если мыши постоянно находятся в темноте, их циркадный ритм сохраняется, но его период снижается до 23,5 ч, что видно по смещению графиков влево. Для наглядности и во избежание промежутков на графике данные для каждого следующего дня показаны справа и внизу по отношению к данным текущего дня. Воспроизводится с модификациями в соответствии со статьей Yang et al., 2012.

На протяжении тысячелетий считалось, что суточные вариации длительности сна и бодрствования определяются внешними сигналами, главным образом, временем заката и восхода. Однако эксперименты такого типа, как описан на рис. 3.1, показали, что даже при отсутствии внешних сигналов у животных продолжается привычный ритм сна и бодрствования, питания и изменений температуры тела. Такая цикличность означает, что где-то в организме существуют внутренние часы, отсчитывающие циркадный (*circadian*) ритм жизни (*circa* означает «около», а *dian* означает «день»).

Насколько точны эти внутренние (биологические) часы, и как их сопоставить с часами, сделанными руками человека? Главные характеристики любых часов – как биологических, так и рукотворных – стабильность хода и точность. Стабильность отражает среднее отклонение показаний за множество циклов, тогда как точность указывает на близость показаний часов к эталонному значению. Если колебание маятника должно совершаться за 1 с, а средний период колебания составляет 0,8 с, такие часы нельзя назвать очень точными (погрешность составляет 20%). Но если за десятки тысяч колебаний минимальный и максимальный период колебания остается в пределах от 0,79999 до 0,80001 с, стабильность хода таких часов очень высока. Как следует из рис. 3.1, период циркадного ритма мышей не соответствует в точности 24 ч, а ближе к 23,5 ч.⁴³ Таким образом, по отношению ко времени вращения планеты биологические часы

⁴³ Vitaterna et al., 1994.

мышей все же достаточно точные (отклонение составляет около 2%). У животных, ведущих ночной образ жизни, период циркадного ритма обычно чуть меньше 24 ч, а у животных, ведущих дневной образ жизни, таких как человек, он чуть больше 24 ч. А вот стабильность биологических часов весьма показательна. Это видно из рис. 3.1: сдвиг к более раннему началу активности примерно одинаков изо дня в день. Исследования показывают, что при жизни в полной темноте стандартное отклонение времени начала активности мышей не превышает 10–20 мин, что для периода в 23,5 ч составляет около 1%⁴⁴.

Именно эта удивительная стабильность циркадного ритма, по-видимому, позволяет некоторым людям ежедневно просыпаться в одно и то же назначенное время. Вот что писал об этом Уильям Джеймс в трактате «Принципы психологии»: «Всю жизнь меня поражало, что каждую ночь и каждое утро я просыпаюсь в одно и то же время с точностью до минуты». Однако в лабораторных экспериментах такая удивительная стабильность наблюдается далеко не всегда. По-видимому, самопроизвольное пробуждение отчасти связано со способностью спящего мозга улавливать какие-то внешние сигналы⁴⁵. Тем не менее, как мы увидим в главе 7, стабильность в 1% превышает стабильность часовых механизмов, создававшихся часовщиками вплоть до XVII в., когда Христиан Гюйгенс изобрел новые часы с маятником.

ЖИЗНЬ В ИЗОЛЯЦИИ

Циркадный ритм, наблюдающийся без воздействия каких-либо внешних сигналов, называют *свободным циркадным ритмом*. Изучение свободного циркадного ритма у людей осложняется тем, что для таких экспериментов нужны добровольцы, соглашающиеся жить в полной изоляции от внешнего мира на протяжении многих дней или даже месяцев. В одном из самых знаменитых экспериментов такого рода в 1972 г. французский геолог Мишель Сифр шесть месяцев прожил в пещере в Техасе. Эксперимент был выполнен в рамках одного из проектов НАСА, предпринятого с целью изучения влияния длительной изоляции на тело и мозг участников будущих межпланетных экспедиций. Сифр расположился в пещере глубоко под землей, куда ему поставляли воду и пищу, и где установили оборудование, регистрировавшее его режим сна. Освещенность и температура в пещере никак не менялись в зависимости от времени суток на поверхности, так что Сифр никак не мог определить время. Он жил в «свободном ритме», но, в отличие от лабораторных мышей, не был в постоянной темноте. В любой момент он мог позвонить на поверхность и попросить включить или выключить свет в пещере.

У мышей в подобных экспериментах не было выявлено явных признаков дискомфорта или физиологического стресса. Мы вполне можем представить себе диких мышей, по многу дней живущих в подвалах или пещерах в полной изоляции от каких-либо источников света. Кроме того, для грызунов зрение не так важно, как для людей. Крысы и мыши – ночные животные, и поэтому для ориентации в пространстве они в гораздо большей степени полагаются на уши и чрезвычайно сложно устроенные усики, чем на глаза. Люди переносят подобные эксперименты намного хуже. Сифр страдал от приступов депрессии, провалов в памяти, забывчивости и даже помышлял о самоубийстве. И его циркадный ритм совершенно нарушился. В первые дни он растянулся до 25 или 26 ч, затем стал очень изменчивым. Иногда сутки для Сифра растягивались на 48 ч: он спал по 16 ч и бодрствовал более 32 ч.

На 179 день Сифру объявили, что эксперимент закончен. Он был очень удивлен, поскольку считал, что пробыл в пещере 151 день, т. е. он ошибся на 16%. Время для него растянулось, и его внутреннее ощущение течения времени замедлилось по сравнению с реальным

⁴⁴ Welsh et al., 1986; Herzog et al., 2004.

⁴⁵ James, 1890. О лабораторных экспериментах по изучению самопроизвольного пробуждения см. Moorcroft et al., 1997; Born et al., 1999; Ikeda et al., 2014.

временем. Учитывая тяжесть нахождения в изоляции, трудно предположить, что он недооценивал проходящие часы.

Такая форма растяжения времени наблюдалась и в других экспериментах по изоляции людей. В 1988 г. Вероника Ле Гуэн прожила в пещере во Франции 111 дней, а когда вышла на поверхность, считала, что прошло только 42 дня! В 1989 г. итальянский дизайнер интерьеров Стефания Фоллини провела четыре месяца в пещере на глубине 50 футов. Но сама она считала, что пробыла под землей только два месяца. В 1993 г. итальянский социолог прожил в подземной пещере целый год, а когда вышел на поверхность 5 декабря, то считал, что было 6 июня⁴⁶.

Ограниченность таких экспериментов заключается в том, что участвующие в них люди, возможно, не полностью отключены от внешних сигналов. В пещерах существует собственная биосистема; к примеру, там живут летучие мыши и насекомые, по поведению которых можно понять или почувствовать время на поверхности. Так, Сифр рассказывал о своих неудавшихся попытках подружиться с жившей в пещере мышью, а мышь, скорее всего, показывалась по ночам. Чтобы справиться с подобными ограничениями и избавить добровольцев и ученых от необходимости проводить долгое время в удалении от других людей, биологи осуществляют эксперименты в специализированных лабораториях или в бункерах.

В 1985 г. были опубликованы результаты экспериментов, в ходе которых 42 добровольца находились в изоляции от одной недели до одного месяца. В бункерах они жили в одиночных помещениях и не получали никакой информации относительно времени во внешнем мире. Они сами готовили себе еду и могли самостоятельно включать и выключать свет. Они должны были сообщать о времени пробуждения и отхода ко сну, а температуру их тела постоянно контролировали. По оценкам большинства участников эксперимент длился на 20–40% времени меньше, чем на самом деле⁴⁷. Как и в экспериментах в пещерах (и в отличие от экспериментов с грызунами), циркадный ритм людей часто сбивался.

Цикл сна и бодрствования – не единственное свидетельство существования биологических часов. Многие физиологические показатели изменяются в зависимости от времени суток. Например, температура человеческого тела не всегда равна строго 36,6 °С. Она колеблется вокруг этого значения, обычно достигая максимума ранним вечером. У многих участников экспериментов цикл изменения температуры фактически оставался равным 24 ч, даже когда продолжительность цикла сна и бодрствования скакала от 20 до 40 ч. Это означает, что внутри нас существуют разные часы, и они не всегда идут синхронно.

СУПРАХИАЗМАТИЧЕСКОЕ ЯДРО

В глубине мозга каждого человека есть структура, называемая гипоталамусом. А в глубине гипоталамуса, над перекрестом нервов (*хиазмом*), несущих информацию от левого и правого глаза, располагается *супрахиазматическое (надперекрестное) ядро*.

В 1970-х гг. стало известно, что у грызунов с повреждением супрахиазматического ядра полностью нарушается циркадный ритм сна и бодрствования. Они спят отрывочно как в ночное, так и в дневное время. Эти первые наблюдения позволили предположить, что супрахиазматическое ядро управляет циркадным ритмом. Доказательства появились в 1980-х гг. в результате серии новых экспериментов. Один из самых захватывающих экспериментов заключался в трансплантации мозга⁴⁸. У хомяков со свободным циркадным ритмом суточный

⁴⁶ <http://www.nytimes.com/1989/05/17/us/isolation-researcher-loses-track-of-time-in-cave.html>. *San Francisco Chronicle*. Она провела в одиночестве в пещере 111 дней (декабрь 1988); <http://www.telegraph.co.uk/news/obituaries/science-obituaries/6216073/Maurizio-Montalbini.html>.

⁴⁷ Aschoff, 1985. См. также Czeisler et al., 1980; Lavie, 2001.

⁴⁸ Ralph et al., 1990; Weaver, 1998.

цикл сна и бодрствования практически равен 24 ч. Однако существует мутация, приводящая к сокращению цикла до 20 ч. Если супрахиазматическое ядро действительно отвечает за циркадный ритм, по мнению ученых, пересадка этого органа может привести к смене 20- часового цикла на 24-часовой цикл.

Вообще говоря, подобного рода манипуляции с головным мозгом возможны только в научно-фантастической литературе. Однако супрахиазматическое ядро устроено достаточно просто и относится к тем немногочисленным отделам мозга, трансплантация которых вполне реальна. В отличие от большинства отделов мозга супрахиазматическое ядро является четко идентифицируемой структурой и получает сигналы всего из нескольких других областей. Кроме того, оно сообщается с другими частями мозга не только посредством электрических импульсов через хрупкие аксоны, которые не очень хорошо регенерируют, но и выделяет гормоны непосредственно в кровотоки.

Исследователи повреждали супрахиазматические ядра хомяков двух типов и каждому типу пересаживали клетки другого типа. В результате они превратили хомяков с 24-часовым циклом в хомяков с 20-часовым циклом и наоборот. Таким образом, не тело или мозг хозяина управляют циркадным ритмом супрахиазматического ядра; все наоборот: небольшая группа из 10 000 супрахиазматических нейронов берет на себя контрольную функцию и сообщает хозяину, когда ему следует отправляться спать, а когда пора вставать и крутить колесо.

КЛЕТКИ, КОТОРЫЕ ЗНАЮТ ВРЕМЯ

Является ли наличие головного мозга обязательным условием для существования циркадного ритма? Вовсе нет. Следование световым и температурным изменениям, вызванным вращением Земли, а также их предвидение играют настолько важную роль, что биологическими часами снабжены практически все живые существа.

Самые первые эксперименты по изучению свободного циркадного ритма проводились на растении мимоза стыдливая (*Mimosa pudica*), которое днем раскрывает листья, подставляя их к солнечному свету, а ночью закрывает. В 1729 г. французский астроном Жан-Жак Дорту де Меран перенес мимозу в темную комнату и обратил внимание, что на протяжении многих дней растение продолжало раскрывать и закрывать листья в соответствии с истинным временем суток. По-видимому, сам ученый не очень доверял своим результатам. Во времена де Мерана одна из важнейших научных задач заключалась в поисках способов определения времени суток в море, и трудно было поверить, что какое-то примитивное растение обладает собственным часовым механизмом. Де Меран заключил, что поведение растения определяется какими-то иными сигналами, такими как температура или неизвестные магнитные влияния, которые заставляют его раскрывать и закрывать листья. Ученым понадобилось более 200 лет, чтобы понять, что все растения и животные имеют внутренние часы, и даже индивидуальные клетки осциллируют в 24- часовом ритме.

Когда мы говорим, что индивидуальные клетки осциллируют, мы не имеем в виду, что они физически вибрируют, подобно кристаллам кварца, или раскачиваются вперед и назад, как маятник. В данном случае под осцилляцией понимают изменение концентрации внутриклеточных белков. Клетки – не статичные образования. В зависимости от выполняемой в конкретный момент работы в них очень сильно меняется концентрация различных белков. Например, клетки выстилки кишечника усиливают выработку пищеварительных ферментов каждый раз, когда мы едим. Аналогичным образом, при повышении концентрации глюкозы в крови клетки поджелудочной железы активируют синтез белков, задействованных в производстве инсулина.

Но клетки руководствуются не только внешними стимулами, у них есть свой внутренний ритм. Как и мыши, индивидуальные клетки тоже обладают свободным ритмом. При постоянстве температуры и биологической среды многие клетки придерживаются собственного цир-

кадного ритма, что видно по увеличению и снижению концентрации некоторых белков в 24-часовом режиме. Наблюдать за этими осцилляциями можно с помощью хитроумных генно-инженерных манипуляций.

Светляки светятся по той причине, что синтезируют фермент люциферазу, который в присутствии субстрата (небольшой молекулы, называемой люциферин) испускает энергию в виде фотонов света. Ученые встраивали ген люциферазы в самые разные клетки – в бактерии, плесень, растения, фибробласты и, конечно же, в нейроны супрахиазматического ядра. Если транскрипцию гена люциферазы поставить под контроль белка, вырабатываемого в циркадном ритме, концентрация люциферазы в клетке тоже будет осциллировать. В результате такая клетка в буквальном смысле медленно разгорается и медленно затухает, чтобы вновь разгореться примерно через 24 часа.

Каким образом единичная клетка бактерии отслеживает время суток? Прежде чем ответить на этот вопрос, можно задать другой: *зачем клетке нужно знать время?*

ПЕРВЫЕ ЧАСЫ

В главе 7 мы поговорим о том, что без повсеместного внедрения точных часов не было бы промышленной революции. Конвейерные линии, где каждый рабочий выполняет специфическую функцию, требуют координированной работы большого числа людей. Но задолго до промышленной революции, примерно за миллиард лет до ее начала, эволюция уже создала биологические фабрики и решала проблемы координации процессов во времени. Наиболее важная конвейерная линия на планете Земля – это фотосинтез: серия биохимических процессов, в которых фотоны солнечного света взаимодействуют с множеством белков, что приводит к созданию устойчивых и богатых энергией молекул, самой известной из которых является глюкоза.

Цианобактерии – один из видов фотосинтезирующих организмов, а фотосинтез – работа дневная. Как никакой владелец завода не захочет платить рабочим, чтобы они просиживали на работе всю ночь и при этом ничего не делали, так и цианобактерии не могут растратывать энергию на синтез белков фотосинтеза в ночное время. Однако необходимо, чтобы с первыми лучами солнца эти молекулы уже были готовы к работе для максимально эффективного использования доступной солнечной энергии. Эволюция решила эту задачу, изобретя биологический будильник, возвещающий о приближающемся восходе Солнца. Таким образом, одной из движущих сил эволюции циркадного ритма была необходимость точной координации клеточных функций с циклом смены дня и ночи, связанным с вращением Земли (рис. 3.2).

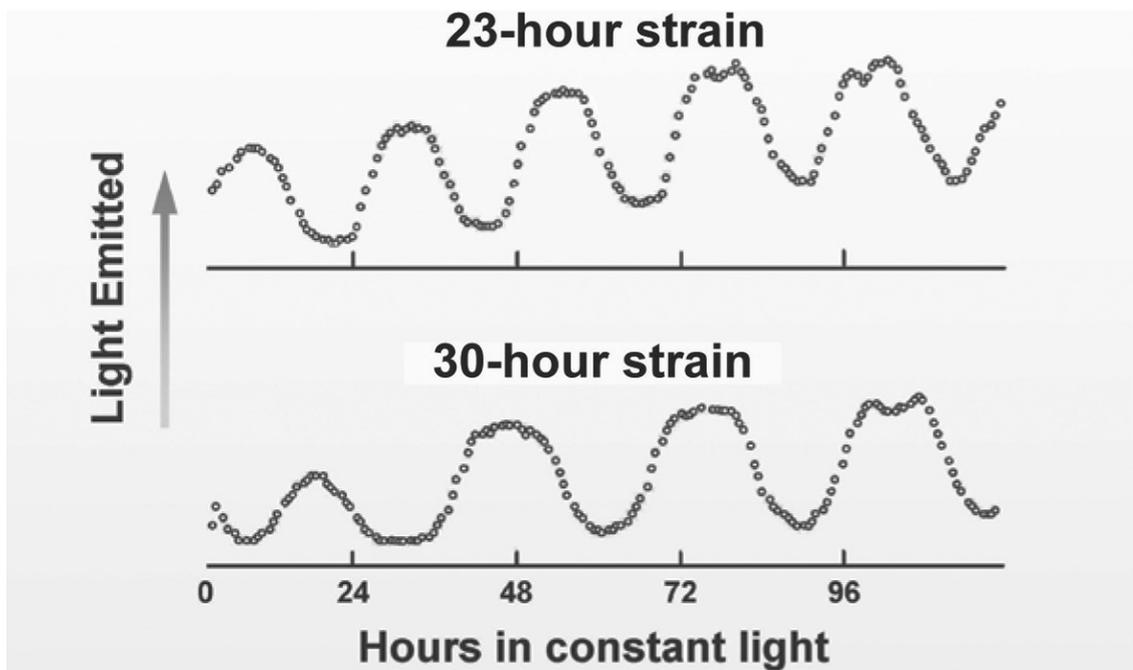


Рис. 3.2. Быстрые и медленные циркадные ритмы у цианобактерий. Циркадные ритмы двух штаммов цианобактерий с периодами приблизительно 23 и 30 часов. Бактерии были генетически сконструированы для излучения света способом, пропорциональным концентрации определенного белка. Когда эти штаммы вынуждены конкурировать друг с другом за ресурсы в условиях 23-часовой светлой темноты, 23-часовой штамм победит; напротив, если их поместить в 30-часовой цикл свет-темнота, 30-часовой штамм победит. (Адаптировано с разрешения Johnson et al., 1998.)

Эволюционное преимущество умения определять время суток (т. е. наличие хороших внутренних часов) было продемонстрировано в изящном эксперименте с разными штаммами цианобактерий. Представьте циркадные ритмы двух штаммов: один имеет короткий цикл около 23 ч, другой – более длинный, около 30 ч. Исследователи поместили оба штамма на одну чашку Петри с целью установить, какой из них в конечном итоге завоюет все пространство. Важно, что эксперимент был поставлен в двух вариантах: в одном варианте свет включали и выключали через каждые 11 ч, имитируя сутки длительностью 22 ч (что близко к естественному 23-часовому циклу для первого штамма), а в другом – через каждые 15 ч, имитируя сутки длительностью 30 ч. Через месяц выяснилось, что в тех условиях, где выдерживался 22-часовой ритм, доминировали бактерии с коротким суточным циклом. Напротив, в условиях 30-часового ритма преобладали бактерии с более длинным циклом⁴⁹. Понятно, что наличие 22-часового цикла при 30-часовой длительности суток или наличие 30-часового цикла при 22-часовой длительности суток приводило к несовпадению световой фазы и фазы активности клеток и, следовательно, к пониженной эффективности использования света. Таким образом, мало иметь биологические часы, необходимо, чтобы их период соответствовал естественному циклу внешних изменений. Только тогда организм получает эволюционное преимущество.

Таким образом, одно из преимуществ обладания внутренними часами заключается в оптимизации фотосинтеза, но, возможно, оно было не первым. Не менее важным для жизни является умение делиться и воспроизводиться. Ключевой этап клеточного деления заключается в репликации ДНК, в которой записаны все необходимые для жизни инструкции. Репликация ДНК чрезвычайно чувствительна к ультрафиолетовому (УФ) излучению (именно по

⁴⁹ Johnson et al., 1998; Ouyang et al., 1998. См. также Summa and Turek, 2015.

этой причине многократные солнечные ожоги повышают риск развития рака кожи, и именно поэтому на тюбиках солнцезащитного крема указаны единицы экранирующей активности). Ультрафиолетовое излучение чрезвычайно опасно для одноклеточных существ, у которых нет таких защитных органов, как кожа, наполненная поглощающим ультрафиолет пигментом меланином. Клетки, делящиеся в условиях сильного УФ-излучения, рискуют повредить свою ДНК, а ночью этот риск снижается. По этой причине некоторые биологи выдвинули так называемую гипотезу «спасения от света», которая гласит, что поначалу эволюция циркадного ритма была направлена на то, чтобы заставить клетки делиться в ночное время⁵⁰.

МЕХАНИЗМ БИОЛОГИЧЕСКИХ ЧАСОВ

А теперь вернемся к главному вопросу: *как отдельно взятая клетка определяет точное время суток?* Первый шаг в поисках ответа на этот вопрос сделали лауреат Нобелевской премии Сеймур Бензер и его студент Рон Конопка из Калифорнийского технологического института в начале 1970-х гг.⁵¹

Лаборатория Бензера изучала знаменитую фруктовую муху *Drosophila melanogaster*, которая, как и все мухи, начинает жить в виде личинки. Сначала личинка окружает себя оболочкой (пупарием) и превращается в куколку, а из куколки через несколько дней появляется взрослое насекомое. Процесс высвобождения из оболочки строго координирован по времени. Насекомые *вылупляются* в ранние утренние часы, чтобы избежать высушивания под действием солнечных лучей. С целью изучения генетики внутренних часов Конопка искал мутации, которые заставляли бы насекомое вылупляться в неправильное время. Он нашел три такие мутации: одна возникала в разное время на протяжении жизни, вторая возникала рано, а третья поздно. В полной темноте все мутанты вели себя примерно одинаковым образом: взрослые особи были либо активны в разное время суток с разными интервалами, а их свободный цикл составлял 19 ч, либо имели аномально длинный цикл протяженностью целых 28 ч. Конопка обнаружил, что все три мутации происходили в одном и том же гене, который он назвал *Period*.

Через 10 лет исследовательская группа под руководством Майкла Росбаша выделила этот ген и определила его нуклеотидную последовательность⁵². В дальнейшем были обнаружены другие гены, играющие ключевую роль в функционировании биологических часов; таким генам часто дают соответствующие названия, например, *Clock*, *Cycle* или *Timeless*.

Процессы с участием этих генов и их продуктов, приводящие к установлению стабильного циркадного ритма, весьма сложны, но общий принцип прост. Настолько прост, что понять его можно на примере устройства туалетного бачка. Каждый раз, когда вы спускаете воду в туалете, бачок вновь заполняется водой, но перелива не происходит. Когда вода находится на нижнем уровне, соединенный с клапаном *поплавок* опускается, клапан открывается, и уровень воды поднимается. При этом поплавок поднимается вверх и закрывает клапан. Если проделать в бачке маленькое отверстие, через которое постоянно могла бы подтекать вода, поплавок в какой-то момент опустился бы достаточно низко, чтобы открыть клапан и заполнить бачок. Так происходят осцилляции: медленное снижение уровня воды в какой-то момент приводит к

⁵⁰ Nikaido and Johnson, 2000; Sharma, 2003; Rosbash, 2009. Одно из доказательств в пользу того, что ранней движущей силой эволюции циркадных часов была оптимизация ритма клеточного деления с целью минимизации пагубного влияния УФ-излучения, заключается в наличии у насекомых светочувствительного сенсора *криптохрома*, подчиняющегося циркадному ритму. Этот белок имеет высокий уровень гомологии с ферментом, ответственным за репарацию повреждений ДНК, полученных под воздействием УФ-излучения.

⁵¹ Konopka and Benzer, 1971. Замечательное научно-популярное описание истории изучения циркадных часов: Reddy et al., 1984; Weiner, 1999.

⁵² Reddy et al., 1984. Этот же ген был независимым образом идентифицирован еще в одной лаборатории (Bargiello et al., 1984).

открытию клапана, уровень воды повышается, и приток воды прекращается. Затем вода снова начинает медленно подтекать, и процесс возобновляется. И если ваш туалет среди ночи по какой-то причине начинает издавать звуки, вполне вероятно, что он осциллирует в результате протечки клапана.

Биологические часы устроены сложнее туалетного бачка, но принцип тот же, хотя механизм, управляющий действием этих часов, носит труднопроизносимое название: *саморегулирующаяся транскрипционно-трансляционная петля обратной связи*. Транскрипционная – потому что закодированные в ДНК гены транскрибируются в РНК. Трансляционная – потому что эти молекулы РНК транслируются в белки. А «саморегулирующаяся петля обратной связи» означает, что эти белки ингибируют дальнейшую транскрипцию тех самых генов, которые привели к их синтезу (тем самым закрывая водяной клапан). Один такой белок носит название *Period* – это продукт гена *Period*. Концентрация белка в клетке постепенно нарастает, и в какой-то момент сам белок отключает ген, с которого синтезируется. Затем белок постепенно разрушается, ген вновь начинает действовать, и это приводит к росту концентрации белка. Догадайтесь, сколько времени длится этот цикл?

Но циркадный ритм – это не просто осцилляции с частотой около 24 ч; такие осцилляции должны быть устойчивыми. Часовых дел мастера XVIII в. боролись с влиянием температуры на ход механических часов и маятников, и эволюции тоже пришлось решить проблему ускорения биохимических реакций с повышением температуры. Мы до сих пор не очень хорошо понимаем, как эктотермные⁵³ организмы, такие как цианобактерии, растения или мухи, поддерживают 24-часовой ритм жизни, невзирая на суточные и сезонные колебания температуры. Но мы знаем, что с саморегулирующейся транскрипционно-трансляционной петлей обратной связи взаимодействует множество других генов и белков, и некоторые из них, по-видимому, компенсируют влияние температуры⁵⁴.

ДЖЕТЛАГ

Радиостанция WWVB, расположенная поблизости от Форт-Коллинза в Колорадо, передает очень важную, но чрезвычайно скучную информацию. На протяжении всего дня она посылает сигналы *всемирного координированного времени* для всех часов во всей Северной Америке, включая те, которые синхронизируются через радиосигналы. Такую же работу выполняет супрахиазматическое ядро головного мозга. Молекулярный механизм, заставляющий работать внутренние часы, существует во всех клетках млекопитающих. Таким образом, концентрация белка *Period* осциллирует не только в нейронах супрахиазматического ядра, но и в большинстве клеток нашего тела⁵⁵. Функция супрахиазматического ядра заключается в том, чтобы все эти часы работали синхронно.

Весь день нейроны супрахиазматического ядра рассылают сигналы в различные отделы нервной системы⁵⁶. Уровень активности этих нейронов косвенным образом отражается в том, спим мы или бодрствуем, а также служит калибровочным сигналом для определения реального времени суток (или того времени, которое супрахиазматическое ядро считает реальным временем суток). Подобно большинству клеток тела, нейроны супрахиазматического ядра суще-

⁵³ Эктотермными являются те организмы, которые получают тепло из внешней среды, эндотермными – те, которые вырабатывают тепло сами и потому способны поддерживать температуру тела на одном и том же уровне. Если речь идет о животном мире, то их также называют холоднокровными и теплокровными организмами. – *Прим. ред.*

⁵⁴ Кроме того, что компенсация колебаний температуры может происходить за счет чувствительных к температуре химических реакций (Smolen et al., 2004), она также может зависеть от изменений связывающей активности специфических аминокислотных остатков в белках при разной температуре (Hussain et al., 2014).

⁵⁵ У дрозофил имеется лишь один вариант гена *Period*, а у млекопитающих их как минимум три.

⁵⁶ Colwell, 2011.

ствуют в полной темноте, глубоко в извилинах мозга. Поэтому возникает вопрос: *откуда они знают правильное время – день сейчас или ночь?*

На языке специалистов в области хронобиологии супрахиазматическое ядро *тренируется* под действием внешних сигналов – синхронизаторов (*zeitgebers*). Конечно же, самым мощным синхронизатором является солнечный свет. Совсем не случайно супрахиазматическое ядро расположено в месте пересечения правого и левого оптического нерва. Благодаря этому расположению ядро получает данные относительно уровня освещенности снаружи черепа. А эта информация позволяет тренировать биологические часы и обеспечивать соответствие их показаний фазе вращения Земли. Однако все это проще сказать, чем сделать.

Любой человек, переживший физические и психические неудобства, связанные с пересечением земных меридианов, знает о сложностях перенастройки биологических часов. Ресинхронизация супрахиазматического ядра после перелета из Лос-Анджелеса в Лондон может занять несколько суток: для перехода на новый ритм после пересечения каждого часового пояса требуется примерно по одному дню. А вот наручные часы можно сразу перевести на местное время.

Это различие отражает разные принципы устройства биологических и рукотворных часов. Частота осцилляций кристалла кварца в большинстве наручных часов составляет 32 768 Гц, так что за час отсчитывается $32\,768 \times 60 \times 60$ осцилляций. Для перевода часов по прибытии в Лондон не требуется переделывать часовой механизм, а нужно только формально изменить общее число осцилляций путем перевода часовой стрелки (или цифры). Напротив, колебание маятника биологических часов происходит за полные сутки, так что их перевод – гораздо более сложная процедура, затрагивающая сам часовой механизм и требующая сдвига на половину колебания. «Колебание» в данном случае – это рост и снижение концентрации внутриклеточных белков. Немедленно изменить концентрацию белков в клетке просто невозможно, как невозможно немедленно «перенастроить» наполовину опустевшие песочные часы.

На экваторе один часовой пояс (шириной 15° долготы) соответствует расстоянию примерно в 1600 км. Таким образом, чтобы пересечь 8 часовых поясов (что эквивалентно путешествию из Лос-Анджелеса в Лондон) за 12 ч нужно перемещаться со средней скоростью свыше 1000 км/ч. Это намного быстрее, чем бегают, плавают или летают любые животные. По этой причине джетлаг – новое явление, вызывающее сонливость и раздражительность не только у туристов и ученых, посещающих международные конференции, но и у пилотов, военных и дипломатов, которые в таком состоянии могут принимать неверные решения.

Однако не все переезды переносятся одинаково тяжело. Перемещение на восток пережить гораздо сложнее, чем перемещение на запад. Перемещение на восток требует перевода наших биологических часов вперед: при перелете из Лос-Анджелеса в Нью-Йорк мы должны перевести наручные часы на три часа вперед, тогда как при переезде на запад у нас остается «запасное время». Переезд с западного побережья на восточное сравним с ранним отходом ко сну, тогда как переезд с востока на запад – с поздним отходом ко сну, а для большинства людей гораздо труднее заснуть рано, чем поздно. Вполне в соответствии с этим интуитивным ощущением обычно гораздо труднее переносится переезд с запада на восток, поскольку биологическим часам труднее перескочить вперед, чем отстать, хотя механистические причины этого явления не совсем понятны.

Мыши, кажется, тоже тяжелее переживают джетлаг при перемещении на восток. Когда группу старых мышей помещают в условия, имитирующие хронический джетлаг к востоку, каждую неделю сдвигая их суточный цикл на шесть часов вперед, через восемь недель эксперимента смертность в этой группе значительно выше, чем среди мышей, которым суточный цикл смещают на шесть часов назад, имитируя перемещение на запад⁵⁷.

⁵⁷ Davidson et al., 2006.

БОРЕМЯ С ЧАСАМИ

Вы «жаворонок» или «сова»: рано ложитесь спать и рано встаете или поздно ложитесь и поздно встаете? Эти «птичьи» термины обозначают *хронотипы*. Для определения хронотипа существует стандартный набор вопросов относительно того, когда человек предпочитает идти спать, когда он наиболее активен, когда ему лучше работается. Хронотипы отражают естественные вариации характера суточной активности в популяции, связанные с влиянием окружающей среды и с возрастом. Но к какому бы хронотипу мы не относились, большинство из нас способны адаптироваться (пусть с недовольством) к различным режимам рабочего дня. Однако есть люди, которые, как ни стараются, засыпают в восемь вечера, что мешает им нормально работать и вести нормальную социальную жизнь. Про таких людей говорят, что у них нарушен суточный ритм сна.

В конце 1990-х гг. в результате изучения истории пяти поколений семьи, в которой было много очень ранних «жаворонков», выяснилось, что для некоторых подобных нарушений существует генетическое основание. Как минимум один представитель этой семьи (который в качестве добровольца участвовал в эксперименте и провел 18 дней в изоляции) имел цикл сна и бодрствования около 23 ч, тогда как в норме этот цикл чуть-чуть превышает 24 ч.

В 2001 г. ученые идентифицировали генетическую мутацию, связанную с *семейным синдромом смещения фазы сна*. Первый идентифицированный ген, связанный с нарушением циркадного ритма у человека, оказался тем же самым геном *Period*, который Бензер и Конопка обнаружили в 1970-х гг. в экспериментах с дрозофилами, что в очередной раз подтверждало ценность многолетних экспериментов на грызунах и дрозофилах⁵⁸. Люди с семейным синдромом смещения фазы сна живут в 23-часовом ритме в мире, где все подчинено 24-часовому ритму. Им постоянно приходится бороться со своими внутренними часами.

Однако не обязательно иметь мутацию в гене *Period*, чтобы столкнуться с такой же проблемой. В современном мире значительное число людей работает посменно: заводские рабочие, пилоты самолетов, медсестры, врачи и полицейские часто работают по ночам и вынуждены спать днем. Цикл сна и бодрствования таких людей обычно не совпадает с их биологическим ритмом. Проблема усугубляется еще и тем, что многие постоянно вынуждены перестраивать свой цикл: они ведут активный образ жизни ночью во время рабочей недели и днем в выходные. Не удивительно, что сменная работа является фактором риска развития целого ряда патологий, включая язву, сердечно-сосудистые заболевания и диабет 2 типа.

Причины этих проблем не до конца понятны, но отчасти они являются результатом несоответствия внутренних физиологических циклов и внешних стимулов. Например, концентрация таких гормонов, как инсулин, обычно повышается в период перед приемом пищи. Хроническое несоответствие между ожиданием приема пищи и ее получением, возможно, способствует развитию диабета⁵⁹. В экспериментах на мышах было показано, что удаление генно-инженерным путем биологических часов из клеток поджелудочной железы при их сохранении в супрадиафрагматическом ядре и других органах повышает вероятность развития диабета. Это подтверждает, что координация многих биологических ритмов нашего организма является важнейшим условием физиологического здоровья⁶⁰.

Пагубное влияние образа жизни, не соответствующего биологическому ритму, демонстрировалось неоднократно. В связи с этим возникает вопрос: *может быть, лучше вообще не иметь внутренних часов, чем бороться с проблемой десинхронизации?* Как ни странно, на этот

⁵⁸ Jones et al., 1999; Toh et al., 2001; Jones et al., 2013.

⁵⁹ Knutsson, 2003; Kivimäki et al., 2011.

⁶⁰ Summa and Turek, 2015.

вопрос можно ответить утвердительно. Как было сказано, хомяки с мутацией генов циркадного ритма могут иметь свободный циркадный ритм с периодом намного больше или намного меньше 24 ч. При одной из мутаций период циркадного ритма составляет 22 ч. В 24-часовом мире такие хомяки живут меньше, чем их немутантные родичи. Но повреждение супрахиазматического ядра этих животных приводит к увеличению продолжительности жизни. Это удивительный пример ситуации, когда какая-то часть мозга, кажется, приносит больше вреда, чем пользы⁶¹.

Способность правильно распределять физиологические функции, предвидеть восход солнца и прием пищи является полезной адаптацией, но если биологический ритм не соответствует ритму внешнего мира, могут возникнуть столь серьезные проблемы, что лучше вообще обойтись без внутренних часов. Возможно, когда-нибудь люди переселятся на другие планеты, и маловероятно, что период вращения какой-нибудь планеты из зоны обитаемости будет находиться в резонансе с нашим биологическим ритмом. Например, период вращения Марса близок к земному (24 ч и 39 мин), а вот на Меркурии «сутки» длятся более 58 земных суток. Таким образом, если этот момент наступит, возможно, правильнее будет не бороться со своими внутренними часами, а отключить их навсегда.

ПРИНЦИП МНОЖЕСТВЕННОСТИ ЧАСОВ

Атомные часы в Национальном институте стандартов и технологий необычны не только тем, что обладают сверхъестественной точностью, но и тем, что измеряют время в невероятно широком диапазоне – от наносекунд до лет. Умеют ли биологические часы, спрятанные в супрахиазматическом ядре, определять время в разных временных диапазонах? С ними ли связана наша способность отличать целую ноту от половины ноты, оценивать время ожидания в кафе или контролировать 28-дневный менструальный цикл?

Один из первых подходов к решению этого вопроса заключался в том, чтобы понять, влияет ли изменение биологического ритма людей, находившихся в изоляции от внешнего мира, на их способность оценивать события в более коротких временных интервалах. В одной серии экспериментов добровольцев просили нажимать на кнопку каждый раз, когда, по их мнению, прошел один час. В период 16-часового бодрствования один человек нажимал на кнопку примерно каждые 2 ч, а в период 44-часового бодрствования – примерно каждые 3,5 ч. В целом наблюдалась корреляция между длительностью циркадного цикла и субъективной оценкой часового интервала. На этом основании можно было заключить, что биологические часы служат для оценки самых разных временных интервалов, включая такие короткие, как в музыкальных ритмах или сигналах светофора. Но оказалось, что это не так. Когда людей просили нажимать на кнопку через интервалы в пределах от 10 до 120 секунд, устойчивой связи с длительностью биологического цикла не наблюдалось.

Отсутствие связи между периодом циркадного ритма и оценкой интервалов времени в пределах нескольких секунд или минут вполне соответствует экспериментальным данным, которые показывают, что для определения времени в разном диапазоне у животных имеются разные инструменты⁶². Например, в экспериментах с грызунами было показано, что мутации, нарушающие циркадный ритм, или повреждения супрахиазматического ядра не влияют на способность оценивать длительность событий, происходящих в пределах нескольких секунд⁶³.

⁶¹ Sharma, 2003.

⁶² Aschoff, 1985.

⁶³ Множество фактов подтверждают независимость циркадных ритмов от способности определять интервалы времени в диапазоне секунд. Вот некоторые из них. Мутации генов циркадного ритма не обязательно затрагивают способность определять секундные интервалы времени (Cordes and Gallistel, 2008; Papachristos et al., 2011). Замедление циркадного ритма у человека (влекущее за собой изменение оценки часового периода) не влияет на способность решать задачи, связанные с опреде-

В следующей главе мы поговорим о том, как ученые догадывались о субъективных ощущениях животных относительно длительности интервалов времени.

Механизм циркадного ритма не связан с нашей способностью оценивать время в пределах секунд. Структура элементов и принцип действия циркадного ритма не позволяют этому механизму измерять столь краткие интервалы времени. Другими словами, у этих часов нет ни секундной, ни минутной стрелки. Реакции транскрипции и трансляции протекают слишком медленно, чтобы их можно было приспособить для отслеживания смены сигнала светофора. Это не означает, что циркадные часы не влияют на оценку времени в других диапазонах, они могут это делать. Но лишь по той причине, что циркадный ритм косвенным путем влияет на множество физиологических и когнитивных функций, включая обучение, память, скорость реакции и внимание – вот почему лучше не садиться в самолет к пилоту, переживающему джетлаг, и не встречать на шоссе невыспавшегося водителя грузовика⁶⁴.

А как мозг оценивает более длительные интервалы времени? Участвуют ли циркадные часы в оценке событий, происходящих в более медленном *инфранианном ритме*⁶⁵?

Луна оборачивается вокруг Земли примерно за 29,5 суток. Этот цикл оказал глубокое влияние на формирование человеческой культуры. Большинство чешской культуры. Большинство календарей, включая наш современный григорианский календарь, основаны на смене примерно 12 полнолуний, происходящих за один год. И во многих языках прослеживается связь между словом «луна» (или «месяц») для обозначения небесного тела и словом «месяц» для обозначения длительности времени.

ПОСКОЛЬКУ ЧЕЛОВЕЧЕСКИЙ МЕНСТРУАЛЬНЫЙ ЦИКЛ ОЧЕНЬ БЛИЗОК ПО ДЛИТЕЛЬНОСТИ К ЛУННОМУ МЕСЯЦУ, ЛУНЕ ОТВОДИЛИ ВАЖНУЮ РОЛЬ В ДЕТОРОЖДЕНИИ. ПО-ВИДИМОМУ, ЭТО ПРОСТОЕ СОВПАДЕНИЕ, ПОСКОЛЬКУ МЕНСТРУАЛЬНЫЙ ЦИКЛ ДРУГИХ ПРИМАТОВ МОЖЕТ БЫТЬ НАМНОГО ДЛИННЕЕ И НАМНОГО КОРОЧЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО. ПОЭТОМУ, КРОМЕ ОЧЕВИДНОГО ФАКТА, ЧТО ЛУННЫЙ СВЕТ МОЖЕТ ВЛИЯТЬ НА СОН И СОЦИАЛЬНУЮ АКТИВНОСТЬ, НИКАКИХ ДОКАЗАТЕЛЬСТВ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ВЛИЯНИЯ ФАЗ ЛУНЫ НА ФИЗИОЛОГИЮ ЧЕЛОВЕКА ПРАКТИЧЕСКИ НЕ СУЩЕСТВУЕТ.

Уже давно существует предположение, что фазы Луны влияют на физиологию человека. Например, как показывает термин «лунатизм», раньше считалось, что в полнолуние некоторые люди сходят с ума. Теперь ученые полагают, что эта идея возникла по той причине, что изменение характера сна, вызванное светом полной Луны, могло провоцировать приступы эпилепсии или биполярного расстройства. Кроме того, поскольку человеческий менструальный цикл очень близок по длительности к лунному месяцу, Луне отводили важную роль в деторождении. По-видимому, это простое совпадение, поскольку менструальный цикл других приматов может быть намного длиннее и намного короче человеческого. Поэтому, кроме очевидного

лением временных интервалов в диапазоне секунд (Aschoff, 1985). Повреждения ЦНС, сильно изменяющие циркадный ритм, не влияют на определение временных интервалов (Lewis et al., 2003). Некоторые данные показывают, что ген *Period* влияет на способность дрозофил контролировать длительность брачных песен (Kyriacou and Hall, 1980), однако эти результаты не всегда воспроизводятся (Stern, 2014) и не согласуются с нашим пониманием механизмов циркадных ритмов. Впрочем, хотя и маловероятно, но возможно, что гены циркадных ритмов могут напрямую влиять на другие аспекты функции нейронов, важные для определения времени в более коротком диапазоне. См. также Golombek et al., 2014.

⁶⁴ Foster and Wulff, 2005; Loh et al., 2010.

⁶⁵ Инфраниантные ритмы – это ритмы, периодичность повторения которых превышает длительность суток, т. е. один цикл ритма повторяется реже, чем раз в сутки. К таким ритмам относятся, например, менструальные циклы. – *Прим. ред.*

факта, что лунный свет может влиять на сон и социальную активность, никаких доказательств непосредственного влияния фаз Луны на физиологию человека практически не существует⁶⁶.

Однако Луна играет важную роль в физиологии многих животных. В частности, развитие и периоды спаривания некоторых морских беспозвоночных синхронизированы с лунным циклом. В естественной среде Луна – главный источник света по ночам. Полная Луна помогает хищникам отыскивать потенциальных жертв, так что наиболее уязвимые фазы жизненного цикла некоторых животных происходят вне периода полнолуния. Какие-то животные спариваются в зависимости от фазы Луны. Половое размножение путем внутреннего оплодотворения требует, чтобы самец и самка находились в одном и том же месте в одно и то же время. Для животных с внешним типом оплодотворения это условие не является обязательным, но все же важно, чтобы самец и самка нерестились примерно в одно и то же время. Морские черви (сегментированные беспозвоночные животные, родственные земляным червям) в сезон спаривания ориентируются на фазы Луны в качестве синхронизирующего сигнала для выпуска икры и спермы. Благодаря этой синхронизации миллионы червей оказываются на поверхности одновременно, что некоторые народы успешно используют в гастрономических целях. Кроме того, жители некоторых индонезийских островов по моменту нереста морских червей определяют начало новогодних праздников⁶⁷.

Наличие циркалунного ритма у морских червей можно продемонстрировать в эксперименте с определением свободного циркадного ритма в лунном варианте. Циркалунные часы сначала нужно настроить, но не по солнечному, а по лунному свету (в лабораторных условиях – путем включения слабого света ночью на несколько часов). Если в период тренировки червей выдерживать в условиях нормальной смены дня и ночи, у них все равно наблюдается 30-суточный репродуктивный цикл. Как им это удается? Используют ли они внутренние часы в качестве маятника с периодом колебания 1 день и отсчитывают 30 колебаний? Если это так, нарушение работы внутренних часов должно изменять длительность репродуктивного цикла. Но это не так: когда морским червям давали препарат, сдвигающий их циркадный ритм, они все равно сохраняли 30-суточный циркалунный цикл размножения⁶⁸. Это еще одно доказательство в пользу существования в организме нескольких типов биологических часов.

МОРСКИЕ ЧЕРВИ (СЕГМЕНТИРОВАННЫЕ БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ ЖИВОТНЫЕ, РОДСТВЕННЫЕ ЗЕМЛЯНЫМ ЧЕРВЯМ) В СЕЗОН СПАРИВАНИЯ ОРИЕНТИРУЮТСЯ НА ФАЗЫ ЛУНЫ В КАЧЕСТВЕ СИНХРОНИЗИРУЮЩЕГО СИГНАЛА ДЛЯ ВЫПУСКА ИКРЫ И СПЕРМЫ. БЛАГОДАря ЭТОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ МИЛЛИОНЫ ЧЕРВЕЙ ОКАЗЫВАЮТСЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ОДНОВРЕМЕННО, ЧТО НЕКОТОРЫЕ НАРОДЫ УСПЕШНО ИСПОЛЬЗУЮТ В ГАСТРОНОМИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ.

Мы видим, что устройства, отсчитывающие время в теле и в головном мозге, отличаются от часов, сделанных руками человека. Одни и те же рукотворные часы могут отсчитывать миллисекунды, секунды, минуты, дни и месяцы нашей жизни. Но в соответствии с принципом множественности внутренних часов у мозга есть разные механизмы для отсчета разных отрезков времени.

⁶⁶ Foster and Roenneberg, 2008. Множество данных говорит о том, что фазы Луны не влияют на физиологию человека, но есть несколько исключений. Например, из одного исследования следует, что фазы Луны влияют на некоторые аспекты сна, в частности, на быстроту засыпания (Cajochen et al., 2013).

⁶⁷ Hoskins, 1993.

⁶⁸ Tessmar-Raible et al., 2011; Zantke et al., 2013.

Предвосхищение суточных изменений освещенности, температуры и наличия пищи настолько важно, что практически все формы жизни от бактерий до *Homo sapiens* имеют высокоточные циркадные часы. Однако циркадные часы так же хорошо подходят для определения времени переключения сигнала светофора, как солнечные часы для измерения скорости бега на стометровку – это часы для решения лишь одного типа задач.

Время, отсчитываемое циркадными часами, не только ограничено определением времени суток, но и недоступно для осознанного восприятия. Конечно, мы чувствуем себя бодрыми или усталыми в зависимости от концентрации определенных белков в нервных клетках супрахиазматического ядра, но мы не *чувствуем* время, как *чувствуем* тепло дневного света. Однако мы субъективным образом замечаем ход времени и прекрасно осознаем длительность происходящих событий. Очевидно, как мы увидим далее, мозг имеет другие средства для отслеживания хода времени. И эти средства позволяют не только пассивно отсчитывать время, но и каким-то образом формируют у нас субъективное ощущение течения времени.

4:00

ШЕСТОЕ ЧУВСТВО

Примерно 38 лет назад я ехал по дороге в Пенсильвании – дремал на заднем сиденье автомобиля. Вдруг я проснулся: женщина за рулем тоже задремала, и машина отклонилась от курса, кажется, пассажирка рядом с ней дотянулась до руля и со всей силы его повернула. Я видел, что происходит в машине, знал, что были крики и шум, я видел раскрытые рты, но не помню звука. Водитель выкручивает руль, машина уходит вправо, и мы очень медленно ударяемся об ограждение, машина взлетает в воздух, и всеми своими внутренностями я чувствую, что это поворотный момент в моей жизни. Воспоминания о событиях, которые должны были длиться одну или две секунды, в моей голове растянулись на целую вечность. Я проснулся в госпитале, и это был последний день, когда я мог ходить.

ДЖОН ХОКЕНБЕРРИ^{69 70}

В опасных для жизни ситуациях наше субъективное ощущение хода времени может сильно изменяться, как будто мы видим все в режиме замедленной съемки. Один из первых научных отчетов об *эффекте замедления времени* был опубликован швейцарским геологом Альбертом Геймом в 1892 г. Он собрал воспоминания членов Швейцарского альпийского клуба, переживших опасные падения или другие экстремальные события. В воспоминаниях 95% этих людей он отмечал «удивительную быстроту работы мозга и чувство уверенности в себе. Работа мозга невероятно усиливалась, в сотню раз активизируясь по скорости или интенсивности... Время сильно расширилось. Люди реагировали с быстротой молнии в соответствии с точной оценкой ситуации. Во многих случаях в памяти внезапно всплывали все события прошлой жизни»⁷¹.

Комиссии по контролю экспериментов на людях не одобряют экспериментов в угрожающих жизни условиях, так что эффект замедления времени сложно воспроизводить и анализировать. Но в некоторых исследованиях людей просили оценить длительность событий, сопровождавшихся сильным страхом или эмоциональным напряжением, таких как землетрясение, просмотр жуткого видео, прыжок с высоты в пустоту или прыжок с парашютом⁷². В большинстве случаев эти исследования подтверждают, что люди обычно переоценивают длительность события, что соответствует сообщениям о замедлении времени (просмотр фильма в замедленном режиме занимает больше времени, чем с обычной скоростью).

Сама по себе переоценка длительности времени не является сколь-нибудь удивительной, поскольку мы знаем множество примеров совершенно безопасных ситуаций, в которых люди также переоценивают длительность времени⁷³. Наше субъективное ощущение времени довольно неточно. «*Чайник, на который смотришь, никогда не закипит*», «*Счастливые часы не наблюдают*»: это происходит именно по той причине, что наше субъективное ощущение хода времени подвержено влиянию множества обстоятельств. Пребывание на очень скучной лекции или ожидание окончания ремонта самолета непосредственно перед вылетом может создать ощущение *хроностазиса* – остановки времени. Напротив, когда вы поглощены чтением

⁶⁹ Джон Хокенберри – современный американский журналист и сценарист. – *Прим. перев.*

⁷⁰ [http://www.worldsciencefestival.com/2014/07/brains-twist-time-watch-deceptive-watchman/\(4/18/15\)](http://www.worldsciencefestival.com/2014/07/brains-twist-time-watch-deceptive-watchman/(4/18/15)).

⁷¹ Noyes and Kletti, 1972.

⁷² Loftus et al., 1987; Buckhout et al., 1989; Campbell and Bryant, 2007; Stetson et al., 2007; Buckley, 2014.

⁷³ Matthews and Meck, 2016.

увлекательной книги, занимаетесь любимым делом или погружены в решение сложной задачи, такой как написание компьютерной программы, время просто улетучивается, необъяснимым образом перескакивая с одного момента на другой без всякого перехода.

Какова связь между объективными показаниями часов и нашим субъективным восприятием времени? Почему в экстремальной ситуации время замедляется? Что происходит в мозге, когда нам кажется, что время улетучивается или останавливается? Прежде чем заняться поиском ответов на эти вопросы, следует разграничить два способа отсчета времени.

ПРОСПЕКТИВНОЕ И РЕТРОСПЕКТИВНОЕ ВРЕМЯ

Проблема отсчета времени решается в двух вариантах. Включение хронометра на старте марафона обеспечивает нас непрерывной информацией относительно перемещения бегунов, но хронометр ничего не сообщает о том, сколько времени они провели на линии старта, или когда они проснулись этим утром. Анализ показаний хронометра – пример измерения *проспективного времени*: определение длительности интервала времени от настоящего к будущему. Напротив, если вы заходите в комнату как раз в тот момент, когда через горлышко песочных часов проскальзывают последние песчинки, вы можете сделать заключение относительно того, сколько времени прошло от начала предыдущего события: час назад кто-то перевернул песочные часы. Но если вы немедленно не перевернули их вновь, они ничего не расскажут вам о том, сколько времени вы уже находитесь в комнате. Это пример измерения *ретроспективного времени*: определение длительности интервала от какого-то момента в прошлом до настоящего момента.

На протяжении дня мы постоянно оцениваем и проспективное, и ретроспективное время. Рассмотрим две ситуации, в которых вам придется использовать умение оценивать временные интервалы. В первой ситуации на вечеринке вы беседуете со своими друзьями Эми и Бертом. Эми просит вас напомнить, что через пять минут ей нужно уходить, поскольку у нее какие-то дела. Во второй ситуации Эми извиняется и уходит, а через пять минут Берт спрашивает вас, как давно она ушла. В обеих ситуациях вас просят оценить временной интервал, но одинаковы ли механизмы определения времени, которые использует ваш мозг? Нет. Механизмы функционирования мозга в этих двух ситуациях в корне различаются. В первом случае вы знаете наперед, что вам предстоит решать задачу определения времени, и вы можете запустить гипотетический хронометр в момент времени $t = 0$ и следить за ним примерно на протяжении пяти минут. Но во втором случае, когда Берт спросил, когда ушла Эми, такой хронометр бесполезен, поскольку вы его не включили. Определение проспективного времени – реальная задача отсчета времени, в которой мозг опирается на работу своего часового механизма. Напротив, определение ретроспективного времени, вообще говоря, не имеет отношения к отсчету времени: это попытка оценки длительности прошедшего интервала времени путем восстановления сохранившихся в памяти событий.

Различие между проспективным и ретроспективным временем отчасти помогает объяснить некоторые загадки субъективного восприятия времени, например, так называемый «парадокс выходных»⁷⁴. Пятичасовое ожидание отложенного рейса при отправлении на каникулы в Грецию кажется бесконечностью, а день осмотра Афин пролетает стрелой. Однако через неделю ожидание самолета выглядит в воспоминаниях как один миг, а насыщенный день осмотра достопримечательностей греческой столицы кажется необыкновенно долгим.

Этот парадокс – не артефакт нашего современного скоростного образа жизни. В 1890 г. Уильям Джеймс писал: «Обычно время, насыщенное разнообразными и интересными событиями, в текущий момент кажется очень кратким, но растягивается, когда мы о нем вспоми-

⁷⁴ Hammond, 2012.

наем. Напротив, пустой отрезок времени кажется долгим в настоящем, но очень коротким в ретроспективе. Неделя путешествий и осмотра достопримечательностей в воспоминаниях может растянуться на три недели, а месяц болезни в воспоминаниях сократится до одного дня»⁷⁵.

Когда мы сосредоточенно занимаемся интересным делом, время летит незаметно, отчасти по той причине, что мы о нем не думаем. Поэтому ваше первое путешествие к Пантеону с 2500-летней историей может проскочить незаметно, а пятичасовое ожидание в аэропорту может тянуться бесконечно долго, поскольку вы поминутно смотрите на часы, задавая себе вопрос: *сколько еще это может продолжаться?* Но в ретроспективе длительность этих интервалов времени отчасти оценивается по количеству сохранившихся в памяти событий. И поскольку нам гораздо приятнее вспоминать новые и яркие впечатления, в памяти с большей вероятностью останется Пантеон, чем первый поход в туалет в аэропорту⁷⁶.

В 1890 Г. УИЛЬЯМ ДЖЕЙМС ПИСАЛ: «ОБЫЧНО ВРЕМЯ, НАСЫЩЕННОЕ РАЗНООБРАЗНЫМИ И ИНТЕРЕСНЫМИ СОБЫТИЯМИ, В ТЕКУЩИЙ МОМЕНТ КАЖЕТСЯ ОЧЕНЬ КРАТКИМ, НО РАСТЯГИВАЕТСЯ, КОГДА МЫ О НЕМ ВСПОМИНАЕМ. НАПРОТИВ, ПУСТОЙ ОТРЕЗОК ВРЕМЕНИ КАЖЕТСЯ ДОЛГИМ В НАСТОЯЩЕМ, НО ОЧЕНЬ КОРОТКИМ В РЕТРОСПЕКТИВЕ. НЕДЕЛЯ ПУТЕШЕСТВИЙ И ОСМОТРА ДОСТОПРИМЕЧАТЕЛЬНОСТЕЙ В ВОСПОМИНАНИЯХ МОЖЕТ РАСТЯНУТЬСЯ НА ТРИ НЕДЕЛИ, А МЕСЯЦ БОЛЕЗНИ В ВОСПОМИНАНИЯХ СОКРАТИТСЯ ДО ОДНОГО ДНЯ».

Тесная связь между памятью и ретроспективным отсчетом времени удивительным образом отражается в истории британского музыкального критика Клайва Уэринга, мозг которого после тяжелого инфекционного заболевания потерял способность создавать новые долгосрочные воспоминания. Хотя многие способности Уэринга не пострадали (в том числе способность исполнять музыкальные произведения и водить машину), поначалу после выздоровления он многократно писал в дневнике «теперь я проснулся», потом зачеркивал и писал «теперь я действительно проснулся в первый раз». Его мозг не может создавать новых воспоминаний и находится в бесконечной петле настоящего времени. Поскольку он не может понять, где находится или как сюда попал, единственная возможная интерпретация для мозга заключается в том, что он только что проснулся. У Клайва нет воспоминаний о том, когда он проснулся, поскольку он фактически не в состоянии запоминать, что случилось в предыдущие минуты и часы.

СЖАТИЕ И РАСТЯЖЕНИЕ ВРЕМЕНИ

Разницу между проспективным и ретроспективным отсчетом времени легко анализировать в лабораторных условиях на временных интервалах длительностью порядка нескольких секунд. Один из самых распространенных способов скрыто повлиять на восприятие времени заключается в изменении *когнитивной нагрузки* в выполняемом задании. «Когнитивная нагрузка» – просто красивый термин для описания степени сложности задачи. В одном из первых экспериментов такого рода людям давали груды перемешанных карт: одних просили сложить карты открытой стороной вверх в виде одной колоды (низкая когнитивная нагрузка), а

⁷⁵ James, 1890, 624.

⁷⁶ Идея о зависимости ретроспективных суждений от количества сохранившихся в памяти событий заложена в основу гипотезы «объема хранилища» (Ornstein, 1969). Родственная концепция заключается в том, что ретроспективные оценки зависят от степени «контекстуальных изменений» за какой-то период времени (Zakay and Block, 1997). Поскольку изменения контекста, такие как сенсорные стимулы, окружающая среда или решаемые задачи, влияют на то, насколько памятными останутся события, эти две гипотезы в значительной степени комплементарны.

других – разделить карты на четыре стопки по мастям (высокая когнитивная нагрузка). На все это отводилось 42 секунды. Когда люди знали заранее, что их попросят оценить количество затраченного на решение задачи времени (определение проспективного времени), среднее оценочное значение составляло 53 секунды в группе людей, складывавших карты в одну колоду, и 31 секунды в группе людей, раскладывавших карты по мастям. Напротив, когда люди не знали заранее, что их попросят оценить длительность эксперимента (определение ретроспективного времени), эти значения менялись соответственно до 28 и 33 секунд.

Десятки последующих экспериментов подтвердили, что проспективный отсчет времени сильно зависит от когнитивной нагрузки: чем сложнее задача, тем короче кажется отрезок времени, на протяжении которого она решалась (53 секунды по сравнению с 31 секундой). С ретроспективной оценкой времени ситуация может быть обратной: чем сложнее задача, тем длиннее кажется временной интервал (28 и 33 секунды). Однако ретроспективная оценка времени не так сильно зависит от когнитивной нагрузки, как проспективная оценка⁷⁷.

Проспективные и ретроспективные оценки времени всегда различаются. Например, в эксперименте с низкой когнитивной нагрузкой участники выполняли один и тот же тест (складывали карты в одну стопку) за одно и то же время, но при этом проспективные и ретроспективные оценки времени расходились (53 и 28 секунд соответственно). Значительное расхождение проспективных и ретроспективных оценок, а также их связь с когнитивной нагрузкой, позволяют увидеть, насколько неточными являются наши представления о времени. Наше субъективное восприятие времени зависит от множества внешних и внутренних факторов, так что в зависимости от ситуации оценки длительности одного и того же процесса могут с легкостью различаться в два раза.

Люди на 25–100% переоценивают количество времени, которое проводят в очередях, в банках и в ожидании ответа по телефону. Когда мы куда-нибудь дозваниваемся, в ожидании ответа мы часто слышим музыку, поскольку, как показывают исследования, при прослушивании музыки время ожидания кажется меньше⁷⁸.

В большинстве лабораторных экспериментов оценивают восприятие временных интервалов в диапазоне от сотен миллисекунд до нескольких секунд. Обычно добровольцев сажают перед экранами компьютеров и просят оценить длительность звуков или скорость смены изображений.

Нейробиолог Вирджиния ван Вассенхов и ее коллеги в качестве *эталонного стимула* использовали изображение неподвижного круга, появлявшееся на экране на 500 миллисекунд (т. е. на полсекунды). А в сравнительных экспериментах тот же круг оставался на экране на протяжении более коротких или длинных промежутков времени. Участников исследования просили сообщить (путем нажатия на одну из двух клавиш), дольше или короче были эти *сравнительные стимулы*. При такой постановке эксперимента оценки были достаточно точными: если изображение появлялось на 450 мс, люди говорили, что длительность стимула была меньше 500 мс, а если оно появлялось на 550 мс, большинство говорило, что длительность была больше. Таким образом, оценка длительности сравнительного стимула была достаточно точной. Но если в качестве сравнительного стимула использовали расплывающийся (растущий в размере) круг, а эталонный стимул оставляли прежним, возникала иллюзия хроностазиса или растяжения времени. Людям кажется, что расплывающийся круг остается на экране дольше неподвижного круга, и поэтому длительность изображения расплывающегося круга, находящегося на экране 450 мс, может восприниматься такой же, как длительность изображения статичного круга, находящегося на экране 500 мс⁷⁹.

⁷⁷ Hicks et al., 1976; Block et al., 2010.

⁷⁸ Tom et al., 1997; Whiting and Donthu, 2009.

⁷⁹ Van Wassenhove, 2009. Это упрощенное описание эксперимента. В реальности сначала человек четыре раза подвергался

На наше восприятие времени в диапазоне нескольких секунд оказывают влияние и некоторые другие физические факторы. Например, звуковые стимулы часто кажутся более длительными, чем зрительные. Амплитуда стимула тоже может влиять на восприятие: в некоторых исследованиях было показано, что иногда людям кажется, что изображение цифры 9 находится на экране дольше, чем изображение цифры 1, хотя обе цифры возникали на экране на одно и то же время. Кроме того, новые или неожиданные стимулы кажутся более длительными, чем знакомые или ожидаемые⁸⁰.

Один из самых известных примеров необъективного восприятия времени связан с иллюзией *остановившихся часов*. Возможно, вы сталкивались с этим, глядя на аналоговые часы с секундной стрелкой. Иногда, взглянув на такие часы, можно подумать: «Черт возьми, они остановились!» Но еще до того, как окончишь про себя эту фразу, понимаешь, что часы идут, поскольку секундная стрелка, наконец, сдвигается. Иллюзия остановившихся часов возникает по той причине, что пауза в движении секундной стрелки нам кажется длиннее, чем наше представление о длительности секунды. По-видимому, дело в том, что в диапазоне нескольких секунд и долей секунды наши собственные действия (движение взгляда) могут исказить наше ощущение времени⁸¹. Как будто в тот момент, когда мы отводим взгляд, какой-то внутренний таймер мозга начинает тикать быстрее, в результате чего за фиксированный интервал времени он тикает большее число раз, и мы переоцениваем длительность прошедшего отрезка времени. Иллюзия остановившихся часов и другие временные иллюзии подтверждают, что наше субъективное восприятие времени является – как можно догадаться – необъективным.

ХРОНОФАРМАКОЛОГИЯ

Как напоминает карикатура на рис. 4.1, наше ощущение времени очень сильно меняется под воздействием психоактивных препаратов. Не удивительно, что этот факт не ускользнул от внимания Уильяма Джеймса, который поделился по этому поводу собственными воспоминаниями: «При интоксикации гашишем возникает любопытное ощущение растяжения времени. Мы начинаем говорить фразу, но когда доходим до конца, кажется, что начали говорить вечность назад»⁸². Действительно, люди часто рассказывают, что под влиянием марихуаны время как бы замедляется. Есть такой анекдот о двух накурившихся хиппи, которые сидят в парке «Золотые ворота», а у них над головой пролетает самолет. Один говорит другому: «Слышь, парень, я думал, он никогда не улетит...»⁸³

Прежде чем двигаться вперед, нужно уточнить, что выражения о замедлении, полете, растяжении или ускорении времени могут вводить в заблуждение⁸⁴, особенно если не задумываться, о чем же, собственно, идет речь.

воздействию эталонного стимула, а затем уже воздействию сравнительного стимула.

⁸⁰ Слуховые и визуальные стимулы (Wearden et al., 1998; Harrington et al., 2014). Новые и знакомые стимулы (Tse et al., 2004; Pariyadath and Eagleman, 2007; Matthews, 2015). Интенсивность, величина и амплитуда стимула (Oliveri et al., 2008; Chang et al., 2011; Cai and Wang, 2014).

⁸¹ Yarrow et al., 2001; Park et al., 2003; Morrone et al., 2005.

⁸² James, 1890.

⁸³ Sacks, 2004. Сакс приписывает этот рассказ Весту (L. J. West, «Psychomimetic Drugs»).

⁸⁴ Wearden et al., 2014; Wearden, 2015.



Рис. 4.1. Глубокая ночь (карикатура Пола Нота/The New Yorker Collection)

Вот, к примеру, выражение «время проносится»: означает ли оно, что человеку кажется, будто стрелки на часах на стене крутятся быстрее? Или оно означает, что человеку удастся сделать меньше дел за тот же отрезок времени? Выражения о полете времени и ускорении времени по своей природе двусмысленны. Быстрее и медленнее – сравнительные прилагательные, так что, как в случае с указанием «справа» или «слева», необходимо назвать точку отсчета. Когда люди говорят об искажении времени, они обычно подразумевают, что внешнее время изменяется по отношению к гипотетическим внутренним часам.

«ПРИ ИНТОКСИКАЦИИ ГАШИШЕМ ВОЗНИКАЕТ ЛЮБОПЫТНОЕ ОЩУЩЕНИЕ РАСТЯЖЕНИЯ ВРЕМЕНИ. МЫ НАЧИНАЕМ ГОВОРИТЬ ФРАЗУ, НО КОГДА ДОХОДИМ ДО КОНЦА, КАЖЕТСЯ, ЧТО НАЧАЛИ ГОВОРИТЬ ВЕЧНОСТЬ НАЗАД». ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ЛЮДИ ЧАСТО РАССКАЗЫВАЮТ, ЧТО ПОД ВЛИЯНИЕМ МАРИХУАНЫ ВРЕМЯ КАК БЫ ЗАМЕДЛЯЕТСЯ. ЕСТЬ ТАКОЙ АНЕКДОТ О ДВУХ НАКУРИВШИХСЯ ХИППИ, КОТОРЫЕ СИДЯТ В ПАРКЕ «ЗОЛОТЫЕ ВОРОТА», А У НИХ НАД ГОЛОВОЙ ПРОЛЕТАЕТ САМОЛЕТ. ОДИН ГОВОРИТ ДРУГОМУ: «СЛЫШЬ, ПАРЕНЬ, Я ДУМАЛ, ОН НИКОГДА НЕ УЛЕТИТ...»

Давайте предположим, что эти воображаемые внутренние часы управляют нашими суждениями о ходе времени в диапазоне миллисекунд, секунд и минут, и что эти часы тикают десять раз в секунду. Если под действием наркотика они ускоряются и начинают тикать двадцать раз в секунду, в результате пять секунд покажутся нам десятью секундами. Такое ускорение внутренних часов обычно описывают выражениями «время замедлилось», «время

остановилось» или «время растянулось», поскольку мы сконцентрированы на собственных ощущениях: мы используем в качестве стандарта свои внутренние часы и замечаем, что время вокруг нас замедлилось. Конечно же, результат восприятия зависит от выбора эталонных часов: кто-то может утверждать, что время ускорилося, поскольку его внутренние часы идут быстрее внешних часов. Так или иначе, но выражения об ускорении или замедлении времени описывают наше восприятие отношения скорости внешних часов к скорости гипотетических внутренних часов, хотя совершенно очевидно, что замедлились или ускорились внутренние часы. Нередко в прессе и в популярной и даже научной литературе можно встретить утверждения, что время замедлилось, хотя на самом деле люди подразумевают, что оно ускорилося.

Рассмотрите рисунок 4.1: если активный компонент гашиша или марихуаны тетрагидроканнабинол (ТГК) вызывает ощущение замедления или остановки внешнего времени (что соответствует наблюдениям Уильяма Джеймса и экспериментальным данным) – или эквивалентного ускорения внутренних часов – не должны ли часы на стене у ковбоя показывать время до полуночи?

Вообще говоря, важно заметить, что наше ощущение быстротечности времени совсем не обязательно согласуется с нашими оценками количества прошедших минут или секунд. Я, например, могу оценить, что пробыл в кресле у зубного врача пять минут, но при этом чувствовать, что провел там час⁸⁵.

Хотя идею о «внутренних ходиках» нельзя воспринимать буквально, она помогает лучше разобраться в нашем восприятии времени. В фармакологических исследованиях нарушения восприятия времени часто трактуются в контексте изменения ритма внутренних часов. Например, многочисленные лабораторные исследования подтверждают анекдотические заявления о замедлении времени под действием марихуаны, и эти результаты можно интерпретировать как ускорение внутренних часов. В одном из первых исследований людей просили просто сообщить, когда истекут 60 секунд после сигнала. После перорального приема дозы ТГК люди оценивали время по-другому: примерно через 42 секунды они полагали, что минута уже прошла, тогда как изначально их оценки были близки к 60 секундам⁸⁶. Такое впечатление, что их внутренние часы начинали идти быстрее, так что они насчитывали 60 секунд всего за 42 секунды (обратите внимание, люди называли более короткий временной интервал, поскольку их просили «отсчитать» минуту; если бы их просили оценить длительность реальной минуты, их ускоренные внутренние часы дали бы завышенный результат).

Наркотики также влияют на ощущение хода времени у животных. Вы спросите: как узнать у животного, сколько времени, по его мнению, прошло с такого-то момента? Крысы и мыши легко обучаются давить на рычаг, чтобы получить еду, и в варианте этого эксперимента (так называемая *схема с фиксированным интервалом*) какой-то сигнал, например включение света, означает начало опыта ($t = 0$). Крыса может нажимать на рычаг сколько угодно раз, но еду она получит, только если нажмет на рычаг через какое-то фиксированное время после сигнала. Постепенно крысы начинают жать на рычаг через промежутки времени, пропорциональные фиксированному интервалу, на котором они тренировались. Если во время тренировок фиксированный интервал составлял 10 секунд, крысы с наибольшей вероятностью будут нажимать на рычаг с интервалами около 10 секунд. Поэтому крысы, тренировавшиеся на интервале 10 секунд, будут нажимать на рычаг раньше крыс, тренировавшихся на интервале 30 секунд. Это один из способов показать, что грызуны и другие животные способны отслеживать временные интервалы в диапазоне нескольких секунд. Что произойдет, если после такого обучения (которое занимает несколько недель) крыса получит наркотик? В эксперименте, где крыс обучали нажимать на рычаг через фиксированные интервалы длительностью 30 секунд, пик реакции

⁸⁵ Wearden, 2015.

⁸⁶ Tinklenberg et al., 1976.

(время нажатия на рычаг) упал с 34 секунд (без наркотика) до 29 секунд (интересно, что в этом эксперименте под действием ТГК крысы определяли время точнее). Это вполне соответствует ощущениям людей о замедлении времени под действием марихуаны, поскольку гипотетические внутренние часы ускоряют ход. Впрочем, такое влияние каннабиноидов на ощущение хода времени не всегда воспроизводится⁸⁷.

Лучше всего хронофармакологические эффекты изучены на примере дофаминовой системы мозга. Дофамин – важный нейромедиатор и модулятор многих процессов, происходящих в головном мозге. В частности, повреждение кластера синтезирующих дофамин нейронов, находящегося в стволе мозга (в *substantia nigra*), приводит к характерному тремору и двигательной дисфункции, наблюдающихся при болезни Паркинсона. Психолог Уоррен Мек и его коллеги из Университета Дьюка предположили, что дофамин меняет скорость действия часовых механизмов мозга. Если крысам, обучавшимся отсчитывать интервал длительностью 20 с, ввести психостимулятор метамфетамин, который, среди прочего, повышает уровень дофамина в головном мозге, они начинают давить на рычаг не через 20, а через 17 с. Однако через несколько дней, все еще находясь под воздействием метамфетамина, крысы медленно возвращаются к исходному ритму, как будто постепенно обучаются работать с хронически спешащими внутренними часами, пересчитывая их показания так, чтобы они соответствовали 20 с. Более того, после отмены наркотика крысы начинают промахиваться в другую сторону: пик реакции смещается за пределы 20-секундного интервала⁸⁸.

Эти и другие фармакологические исследования позволяют многое узнать о том, как люди и животные воспринимают время. Однако интерпретировать подобные эксперименты весьма непросто. Во-первых, результаты часто зависят от поставленной задачи, от анализируемого временного интервала и от того, как участник исследования сообщает о своем ощущении времени. Во-вторых, поскольку практически все лекарственные препараты оказывают множественное нейрофизиологическое действие, очень трудно определить истинную причину смены поведения. Например, каннабиноиды и дофаминергические препараты могут менять степень тревожности, память, моторную активность и физиологические параметры (например, вызывать голод, что может стимулировать животных к выполнению задачи). Также эти препараты меняют степень концентрации человека и животных на выполняемой задаче, что может сказаться на результатах. Наконец, некоторые препараты могут влиять на оценку людьми только коротких или только длинных временных интервалов⁸⁹.

В целом научная литература по теме влияния психоактивных препаратов на восприятие времени показывает, что не существует какого-то одного нейромедиатора, который бы отвечал за наше восприятие времени. Кроме того, поскольку одно и то же вещество может по-разному влиять на оценку длинных и коротких отрезков времени, можно сделать вывод, что не существует универсальных внутренних часов, управляющих восприятием времени в диапазоне от миллисекунд до часов, а это, в свою очередь, подтверждает нашу гипотезу о множественности внутренних часов.

⁸⁷ На практике в большинстве экспериментов с животными используется вариант метода с фиксированным интервалом, в котором определяют пиковое время реакции (так называемый *peak-interval test*), когда животные в некоторых случаях не получают вознаграждение. Эксперименты на крысах описаны в работе Han and Robinson, 2001. В поисках дополнительной информации (как подтверждающей, так и опровергающей данные результаты) можно обратиться к работам McClure and McMillan, 1997; Lieving et al., 2006; Atakan et al., 2012; Sewell et al., 2013.

⁸⁸ Meck, 1996; Coull et al., 2011.

⁸⁹ Rammsayer, 1992; Rammsayer and Vogel, 1992; Rammsayer, 1999; Coull et al., 2011.

ПРИЧИНЫ ЭФФЕКТА ЗАМЕДЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ

Мы уже поняли, что искаженное восприятие времени – скорее правило, чем исключение, и это объясняет загадки искажения времени при сильном эмоциональном потрясении и в угрожающей жизни ситуации. Но замедление времени в экстремальных ситуациях – это особый случай, поскольку речь идет не просто о преувеличении длительности события. Существует несколько гипотез, пытающихся объяснить эффект замедления времени в опасных ситуациях⁹⁰. Я остановлюсь на трех из них и назову их гипотезами *разгона процессора*, *гиперпамяти* и *метаиллюзии*.

Разгон процессора. Если процессор вашего компьютера работает на частоте 2 ГГц, это означает, что он осуществляет 2 млрд операций в секунду. Эта скорость контролируется компьютерными «часами». Функция этих «часов» заключается не в том, чтобы определять время суток, а в том, чтобы установить частоту операций процессора (в данном случае путем подачи электрического сигнала через каждые 0,000000005 с). Любители компьютерных игр знают, что процессор компьютера можно разогнать путем увеличения тактовой частоты (числа импульсов в секунду). В результате компьютер все будет делать быстрее: он может воспринимать и обрабатывать больше информации в единицу времени (недостаток в том, что процессор может расплавиться). Возможно, эффект замедления времени вызван эквивалентной ситуацией в нейросетях: способность людей реагировать быстрее и воспринимать события в замедленном ритме может объясняться тем, что в угрожающей жизни ситуации мозг начинает работать в ускоренном режиме.

Можно ли «разогнать» мозг? Время, необходимое мозгу для выполнения той или иной задачи, определяется множеством факторов, включая: 1) скорость передачи электрических сигналов (потенциалов действия или «спайков») вдоль аксонов; 2) время передачи электрохимических сигналов в синапсах (*синаптическая задержка*); 3) количество времени, необходимое синаптическому току для изменения потенциала нейрона, достаточного для запуска потенциала действия (что отчасти определяется так называемой *временной постоянной* нейрона). Скорость распространения потенциала действия и синаптическая задержка в значительной степени определяются достаточно жесткими биофизическими и биохимическими параметрами и вряд ли могут изменяться в значительной степени при реакциях типа «борьба или бегство». А вот время возбуждения нейрона в ответ на шквал сигналов от пресинаптической клетки может уменьшаться за счет нескольких механизмов⁹¹.

Один из простейших механизмов заключается в том, что нейромодуляторы (такие как норадреналин), активно выделяющиеся в мозг и кровотоки при реакциях «борьба или бегство», деполаризуют возбуждающие нейроны мозга (или ослабляют торможение), что слегка облегчает и ускоряет их возбуждение. Однако изменение времени возбуждения нейрона вряд ли может повысить скорость больше, чем на 10 или 20%. Например, известно, что некоторые стимуляторы, такие как кофеин, могут повысить скорость реакции людей на стимулы (снизить время реакции), однако речь идет об изменениях в пределах 10%⁹². Посредством пока не очень

⁹⁰ Loftus et al., 1987; Sacks, 2004; Stetson et al., 2007; Arstila, 2012.

⁹¹ Для этого есть несколько способов: 1) деполаризация нейронов на несколько милливольт, приближающая к пороговому значению потенциала действия; 2) эффективное снижение временной постоянной нейрона за счет закрытия каналов утечки калия; 3) увеличение количества транмиттеров, выделяемых пресинаптическими терминалями; 4) ингибирование тормозных нейронов, которые часто подавляют и замедляют ответ возбуждающих нейронов. Можно даже предложить поднять локальную температуру мозга путем усиления кровотока, чтобы ускорить процессы в нейронах.

⁹² Martin and Garfield, 2006; Terry et al., 2008; Swann et al., 2013. Еще одна проблема, связанная с гипотезой «разгона процессора», заключается в том, что даже если мозг имеет возможность переключаться на «скоростной режим», совсем не

понятных механизмов нейромедиаторы могут усилить и сконцентрировать наше внимание на внешних событиях. В частности, хорошо известно, что эффективность действия и время реакции корректируются путем сосредоточения внимания. Хотя такие эффекты, вполне вероятно, играют какую-то роль в фантастических достижениях профессиональных спортсменов, вряд ли с ними можно связывать способность «реагировать с быстротой молнии в соответствии с точной оценкой ситуации» или «внезапно вспоминать все события прошлой жизни».

Сообщения людей, молниеносно спасавших жизнь в сложной и опасной обстановке, вряд ли отличаются большой точностью. Причем в большинстве случаев до нас доходят рассказы профессионалов – автогонщиков, летчиков-истребителей и спортсменов, т. е. людей, чья нервная система подготовлена тысячами часов тренировки. Как писал один исследователь, «опытный гребец может привести тело, лодку и весло в единственно правильное соответствие, которое позволит пройти пороги и водопады. Менее опытные не знают, как себя вести, паникуют и совершают действия, которые только усиливают опасность»⁹³.

Многие исследователи описывали проявления сверхчеловеческих возможностей у людей, оказавшихся в угрожающей жизни ситуации, но у нас также нет недостатка в описаниях ситуаций, когда в подобных условиях люди принимали неверное решение. Так что, возможно, именно приходящие с опытом концентрация внимания и отточенность движений позволяют профессионалам быстро и правильно действовать в опасных ситуациях, тогда как остальные – несмотря на субъективное восприятие замедления времени – пассивно трепещут или застывают перед лицом опасности.

Гиперпамять. Еще одно возможное объяснение эффекта замедления времени заключается в том, что это иллюзия, возникающая уже после завершения события. Иллюзия в том смысле, что люди воспринимают происходящее в замедленном ритме не в момент события, а когда возвращаются к этому событию в памяти. Во время реакции «борьба или бегство» мозг может повышать временное и пространственное разрешение памяти. Другими словами, в таком состоянии скорость восприятия событий более или менее нормальна, но серия воспоминаний может быть подробнее обычного, так что в ретроспективе кажется, что все происходило в замедленном ритме.

Вот что рассказывал человек, который едва не попал под поезд: «Когда поезд приблизился, я увидел машиниста. Это было как в замедленном кино, в котором кадры сменялись толчками. Так я увидел его лицо»⁹⁴. Но как понять, таким ли было восприятие ситуации в момент опасности, или так картина отразилась в воспоминаниях? Более того, как понять, было ли это на самом деле (действительно ли человек смог разглядеть лицо машиниста)? Известно, что наши воспоминания об эмоциональных событиях бывают весьма ненадежными. Например, жертвы тяжелых преступлений часто ошибаются при опознании подозреваемого⁹⁵.

Тем не менее вполне вероятно, что какая-то версия гипотезы о гиперпамяти отчасти может объяснить эффект замедления времени, поскольку нейромодуляторы, выделяющиеся в момент опасности или серьезного эмоционального потрясения, действительно могут усиливать память. Считается, что это одно из объяснений так называемой *вспыхивающей памяти* (например, когда люди могут вспомнить, где находились в тот момент, когда услышали о таких тра-

очевидно, что это переключение произойдет настолько быстро, как требуется в угрожающих жизни ситуациях. Чтобы мозг перешел в этот гипотетический режим, сенсорные сигналы, свидетельствующие об угрожающем масштабе опасности, сначала должны поступить от органов чувств в мозг и пройти обработку, и только потом сработают все сигнальные системы, и мозг и кровоток наполнятся нейромодуляторами реакции «борьба или бегство», такими как норадреналин и адреналин. Так что запуск такого сверхскоростного режима должен занимать не меньше секунды.

⁹³ Buckley, 2014.

⁹⁴ Цитируется в соответствии с Arstila, 2012.

⁹⁵ Loftus, 1996; Buonomano, 2011.

гических событиях, как теракты 11 сентября). Еще один пример усиления памяти при реакции «борьба или бегство» – посттравматическое стрессовое расстройство, при котором у людей возникают чрезмерно сильные и навязчивые воспоминания⁹⁶.

Конечно, гипотеза гиперпамяти не может объяснить, почему в экстремальной ситуации люди действовали быстрее и четче, чем обычно. Не может она объяснить и такое распространенное суждение, что эффект замедления времени наблюдается именно в момент опасности. В этой связи я могу лишь поделиться собственным воспоминанием о замедлении времени. Во время автомобильной аварии моя машина получила удар сбоку, перевернулась и влетела в телефонный столб. И я очень хорошо помню, что все это действительно происходило очень медленно, и что в тот момент я подумал: «Ничего себе, время действительно замедляется!» Но в подтверждение того, что в подобные моменты мы воспринимаем ситуацию не самым адекватным образом, должен сказать, что не помню, чтобы действовал как-то особенно быстро или четко, и даже не помню, что сработали боковые подушки безопасности. Но поскольку я подумал о том, что время замедлилось, значит, именно *во время аварии* я воспринимал события в замедленном ритме. Следовательно, гипотеза гиперпамяти не может полностью объяснить эффект замедления времени.

Метаиллюзия. Недостаток обеих описанных выше гипотез заключается в том, что они не учитывают один важнейший факт относительно субъективного опыта. Идет ли речь о цвете, звуке или течении времени, наши осознанные воспоминания являются иллюзией – отчетом об элементах (или событиях) внешнего мира, которые наш неосознанно действующий мозг считает наиболее важными. Эта концепция может показаться странной (мы вернемся к ней в главе 12), но сейчас, чтобы понять, что я подразумеваю под иллюзорностью субъективного опыта, имеет смысл поговорить об осознанном ощущении обладания собственным телом.

Одно из самых глубоких субъективных ощущений человека заключается в том, что ваша рука (ваше тело) принадлежит именно *вам*, а не кому-то еще. Когда вы случайно попадаете молотком не по гвоздю, а по собственному пальцу, вы *чувствуете* боль. И хотя ощущение боли создается в мозге, странным образом, вы чувствуете ее не там – она переносится в то место в пространстве, где находится ваш палец.

Иллюзорность осознания собственного тела можно продемонстрировать на примере синдрома фантомной конечности. Некоторые люди после ампутации конечности продолжают чувствовать ее так же живо, как большинство из нас чувствуют реальные. Этот феномен говорит о том, что мозг так сильно работает над тем, чтобы создать у нас ощущение обладания костями, мышцами и нервами, составляющими наши конечности, что иногда продолжает поддерживать эту иллюзию даже после исчезновения конечности. Таким образом, иллюзией является не фантомная конечность, а чувство обладания реальными конечностями.

Синдром фантомной конечности – странное явление, но попытки разрешить эту загадку отвлекают от более важного вопроса: как мозг заставляет нас осознавать обладание собственным телом?⁹⁷ Аналогичным образом, изучение вопроса об эффекте замедления времени в экстремальных ситуациях уводит нас от настоящей тайны – нашего «нормального» восприятия течения времени.

Представьте себе, что сидите в пустой комнате, смотрите фильм и вдруг понимаете, что скорость воспроизведения неправильная. Губы движутся слишком медленно, предметы падают слишком долго. Как это исправить? Если вы не знаете, с помощью какого устройства проектируется фильм, как вы можете понять, почему он идет не с той скоростью? Для проек-

⁹⁶ Cahill and McGaugh, 1996; Schacter, 1996.

⁹⁷ Я вовсе не хочу принизить важность изучения синдрома фантомных болей. Это очень серьезная медицинская проблема после ампутации конечностей.

тора «правильная» скорость – лишь одна из множества возможных скоростей. Наше нормальное чувство времени – мысленный конструкт, который, вообще говоря, может иметь разные скоростные установки. Гипотеза метаиллюзии подразумевает, что эффект замедления времени – иллюзия иллюзии, так что пытаться объяснить этот феномен без понимания нормального механизма субъективного восприятия времени – все равно что пытаться исправить скорость воспроизведения фильма, ничего не зная о том, как настроить проектор на правильную скорость.

Осознание – отсроченная версия не только того, что происходило во внешнем мире, но и того, что бессознательно происходило в мозге. Например (как мы увидим в главе 12), наблюдая за активностью нейронов мозга, можно предсказать, что человек примет решение двинуть пальцем за 900 мс до того, как он это сделает, т. е. за сотни миллисекунд до того, как человек осознает, что «сам» принял решение двинуть пальцем. Так что, даже если опасность заставляет мозг переходить в ускоренный режим (что приводит к ускорению наших действий), сознание работает слишком медленно, чтобы управлять этим процессом. Поэтому рассказы об «удивительной быстроте работы мозга, проявляющейся в повышенной скорости принятия решений»⁹⁸, возможно, являются лишь еще одним бессознательным обманом мозга в отношении разума.

Мозг может не только проектировать ощущение боли в ту точку пространства, где находятся наши конечности. Если рядом с вашей рукой положить искусственную руку, мозг может изменить восприятие таким образом, что вы будете чувствовать свою руку там, где находится искусственная рука, как будто мозг соглашается считать искусственную руку вашей рукой (так называемая *иллюзия резиновой руки*). По-видимому, мозг может не только проецировать ваше ощущение конечностей в разные точки пространства, но и маркировать события как *быстрые* или *медленные*. Таким образом, наше субъективное суждение о быстром или медленном ходе времени может быть не связано с тем, с какой скоростью мозг обрабатывает информацию, т. е. со скоростью внутренних часов мозга⁹⁹.

В качестве дополнительного подтверждения гипотезы метаиллюзии нужно сказать, что при угрожающих жизни обстоятельствах нарушается не только восприятие времени. Ниже представлены три фрагмента из сотни свидетельств, опубликованных в 1976 г.¹⁰⁰ Первое свидетельство принадлежит 24-летнему автогонщику, который попал в аварию на скорости 100 миль в час, в результате чего его машина несколько раз перевернулась в воздухе, оторвавшись от земли на высоту 30 футов:

Казалось, что это длилось целую вечность. Все происходило очень медленно, и мне казалось, что я играю на сцене, но при этом могу видеть со стороны, как я снова и снова переворачиваюсь в машине. Как будто я смотрел на все это из зрительного зала.

А вот что сообщил 21-летний студент университета, попавший в серьезную автомобильную аварию:

В этот момент время как бы остановилось. Кажется, все длилось целую вечность. Пространство тоже стало неестественным. Было похоже на то, что ты сидишь в зале и смотришь фильм.

И, наконец, воспоминания солдата времен Второй мировой войны, чья машина подорвалась на mine:

⁹⁸ Arstila, 2012.

⁹⁹ Wearden, 2015.

¹⁰⁰ Noyes and Kletti, 1976.

Я не чувствовал, что время идет: ничего не менялось. С пространством тоже было что-то не так, и я существовал, кажется, только в мыслях.

Таким образом, оказывается, что в критических ситуациях изменяется восприятие не только времени, но и восприятие пространства. В любом другом контексте приведенные выше высказывания показались бы галлюцинациями или нарушением сознания. Возможно, внезапный поток эндогенных нейроактивных веществ, выделяющихся при реакции «борьба или бегство», перегрузил нейронную сеть мозга и вызвал галлюцинации. Так что, возможно, эффект замедления времени правильнее воспринимать как еще один вариант нарушения сознания, имеющий мало общего с реальностью.

КОМПРЕССИЯ ВРЕМЕНИ

Три перечисленные выше гипотезы, объясняющие эффект замедления времени, не являются взаимоисключающими. Я подозреваю, что концентрация внимания в момент опасности позволяет тренированным профессионалам совершать быстрые и четкие действия, но и феномен гиперпамяти тоже вносит вклад в кажущееся замедление времени, однако в целом иллюзия изменения скорости событий связана с еще более загадочной иллюзией сознания.

Мы считаем эффект замедления времени и другие временные иллюзии результатом нарушения восприятия времени, точнее, восприятия скорости событий, но все не так просто. На самом деле, мы постоянно используем способность мозга сжимать и растягивать время.

Каким словом заканчивается первый куплет вашей любимой песни? Не знаю, как вам, а лично мне, чтобы добраться до последнего слова, нужно начать сначала: *How many ... man walk ... him a man*¹⁰¹. Однако, чтобы добраться до конца, не нужно мысленно воспроизводить стихи в ритме песни. В мыслях мы умеем повторять стихи быстро или медленно, произнося слова скороговоркой или смакуя каждый звук. Вообще говоря, способность выполнять одно и то же действие с разной скоростью является важным свойством нашей двигательной системы. Я говорю медленнее в разговоре с детьми и тороплюсь, когда время лекции ограничено. Вы можете медленно завязывать шнурки, когда обучаете этому ребенка, но делаете это быстро, когда нужно срочно выбежать из дома, а мысленно можете завязать шнурки даже быстрее, чем в реальности. Самые быстрые и самые медленные наши движения различаются по скорости примерно в пять раз: например, самый медленный и самый быстрый музыкальный ритм обычно составляют соответственно 40 и 200 ударов в минуту. Но доказано, что мозг может воспроизводить действия с еще более высокой скоростью.

В главе 1 мы говорили о клетках места – нейронах, которые возбуждаются, когда крыса оказывается в определенном месте. Когда крыса исследует открытое пространство, скажем, участки с номерами 1→2→3→4→5, в каждом из этих участков возбуждаются специфические нейроны. Если обозначить эти нейроны буквами от А до Е, наблюдается поочередное возбуждение клеток места (назовем этот порядок возбуждения *нейронной траекторией*): А→В→С→D→Е. Эту зависимость можно считать «нейронной характеристикой» крысиного опыта по освоению данной траектории. Допустим, для продвижения по этой траектории крысе нужно 10 секунд, следовательно, возбуждение нейронной траектории А→В→С→D→Е займет столько же времени.

Удивительно вот что: если анализировать активность тех же клеток позднее, в тот момент, когда животное спит или находится в состоянии покоя, последовательность А→В→С→D→Е возбуждается чаще, чем это можно объяснить статистически, т. е. чаще, чем если бы животное в этот день не проделывало путь 1→2→3→4→5. Одно возможное объясне-

¹⁰¹ Боб Дилан. «На крыльях ветра» (Blown in the Wind). – Прим. перев.

ние заключается в том, что мозг крысы проигрывает пережитые ранее ситуации. Но эти ситуации проигрываются совсем в другом ритме. При воспроизведении та же последовательность возбуждения $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ может длиться не более 200 миллисекунд вместо 10 секунд. Возможно, это мысленное воспроизведение траектории необходимо для формирования воспоминаний и помогает сохранять в мозге пережитый опыт (заметьте, я не имею в виду, что крысы вновь осознанно переживают свое путешествие, вероятно, это не так). Также может быть, что это повторение является элементом планирования будущих действий. Например, если крыса в процессе выполнения задачи должна остановиться в каком-то месте, чтобы получить вознаграждение, а потом направиться дальше, картина активности нейронов во время остановки может использоваться для предсказания дальнейших действий¹⁰². Это можно интерпретировать так, что мозг крысы планирует будущие действия, которые совершатся в ближайшие 10 секунд, за какие-то доли секунды. Ускоренное повторение нейронных траекторий и способность контролировать скорость мысленного воспроизведения песни говорят о том, что мозг действительно может обрабатывать и генерировать временные образы с разной скоростью. Однако остается открытым вопрос, связана ли эта особенность функционирования мозга с субъективным ощущением сжатия и растяжения времени.

Наше «чувство» времени не является истинным чувством, как зрение или слух. У нас нет органа времени, а в глазах, ушах, носу, на языке или на коже нет рецепторов времени. Нет и быть не может, поскольку время – не такое физическое свойство, как свет или давление молекул воздуха. И все же мозг не только измеряет время, но и воспринимает его течение, и нам кажется, что мы чувствуем ход времени. Однако существует множество временных иллюзий, а это говорит о том, что точность нашего чувства времени может сильно расходиться с объективными показателями. Существование временных иллюзий не является неожиданностью. Практически весь субъективный опыт, включая ощущение цвета и боли, а также ощущение обладания собственным телом, очень сильно зависят от обстоятельств, тренировки, внимания и воздействия лекарственных препаратов. Психологам и нейробиологам эти иллюзии очень многое рассказали о работе мозга, но самый важный урок, возможно, заключается в том, что все субъективные ощущения – измененные или нет – по сути, являются иллюзиями. И поэтому мы не должны позволить временным иллюзиям увести нас от более важного вопроса: каким образом мозг создает осознанное ощущение течения времени?

¹⁰² Об экспериментах по мысленному повторению полученной информации написано множество статей. См., например, Wilson and McNaughton, 1994; Foster and Kokko, 2009; Karlsson and Frank, 2009.

5:00

ВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗЫ

Прости меня, когда я целую этого парня.
ПРИПИСЫВАЕТСЯ ДЖИМИ ХЕНДРИКСУ

Возможно, вы никогда об этом не задумывались, но в процессе любого разговора ваш мозг усердно отсчитывает длительность каждого слога, пауз между словами и общий ритм речевого потока, колеблющего ваши барабанные перепонки.

Минимальные единицы звукового строя языка – фонемы – составляют набор звуков каждого языка (между буквами и фонемами существует приблизительная корреляция, однако одна и та же буква может соответствовать разным фонемам, например, английская буква *g* в словах *gin* [ган] и *gin* [джин]). В большинстве случаев смысл фразы определяется последовательностью фонем. Однако иногда одна и та же последовательность фонем может иметь совершенно разное значение, что приводит к двусмысленности:

Пар усов – пару сов – парусов

Италия – и та ли я – и талия

Казнить, нельзя помиловать – Казнить нельзя, помиловать

Подобные двусмысленности обычно можно разрешить за счет других нюансов произношения, включая длительность слогов, интонацию, ударения и паузы между словами. Например, самый простой способ произнести эти фразы однозначным образом заключается в том, чтобы подчеркнуто выдерживать паузы между словами. В последней фразе более длинная пауза между словами «нельзя» и «помиловать» означает, что казнить нельзя, а более длинная пауза между словами «казнить» и «нельзя» означает, что нужно казнить. Скорость речи тоже помогает передать смысл. Рассмотрим предложение: *Мы встретили девушку с тортом*. Кто был с тортом – мы или девушка? Если сжать словосочетание «девушку с тортом», получится, что с тортом была девушка, а если это словосочетание растянуть, получится, что с тортом были мы¹⁰³.

Неприятный результат подобной неоднозначности наблюдается достаточно часто, когда люди поют любимые песни с перевернутыми словами. Путаница может возникать по той причине, что исполнителям порой приходится изменять ритм фраз, чтобы попадать в ритм музыки (а иногда у исполнителей просто плохое произношение). Для такой слуховой путаницы есть даже специальное слово – *мондегрин*¹⁰⁴. Известный мондегрин есть в песне Джими Хендрикса «Purple Haze» («Фиолетовый туман»): строчку «*excuse me while I kiss the sky*» (прости меня, когда я целую небеса) многие слышат как «*excuse me while I kiss this guy*» (прости меня, когда я целую этого парня). Как и в разговорной речи, такие двусмысленности отчасти связаны с ритмом и могут быть разрешены путем четкого разделения слов и выдерживания пауз.

Время – важный фактор и для дискриминации отдельных фонем. Например, различие в произношении «б» и «п» отчасти достигается за счет так называемого *времени начала озвончения* – интервала времени между взрывным высвобождением воздуха и началом колебания голосовых связок. Положите руку на горло и произнесете слог «па». Возможно, вы почувству-

¹⁰³ Речь – чрезвычайно избыточный аппарат: обычно у нас существует несколько разных способов пояснить неоднозначные высказывания. И скорость речи – лишь один из этих способов. Другие – контекст и интонация. Несколько примеров статей, описывающих роль временных аспектов в человеческой речи: Lehiste, 1960; Lehiste et al., 1976; Aasland and Baum, 2003; Schwab et al., 2008.

¹⁰⁴ Мондегрин – ослышка, путаница между словами при восприятии на слух. Термин происходит от строчки шотландской баллады «The Bonny Earl of Murray», где вместо «*laid him on the green*» слышится «*Lady Mondegreen*». – Прим. перев.

ете, что между открыванием рта и началом вибрации голосовых связок есть небольшой промежуток времени. А если вы сделаете то же самое, когда произносите слог «ба», заметить этот интервал вы, скорее всего, не сможете. Время начала озвончения для слога «па» обычно составляет около 30 мс, а для слога «ба» – менее 20 мс. И тот факт, что мы различаем эти слоги на слух, означает, что наша система восприятия звука имеет часовой механизм, позволяющий распознавать столь короткие временные интервалы.

Соблюдение ритма в диапазоне временных интервалов от нескольких сотен миллисекунд до нескольких секунд имеет большое значение в *просодике* – учении о ритме музыки и речи. Эмоции, сарказм и вопрос мы выражаем с помощью интонаций, ритма и скорости произнесения слов и фраз.

Словосочетание «хорошая идея» может быть как одобрением, так и насмешкой – в зависимости от интонации говорящего. Изменение темпа речи путем сжатия или растяжения фраз говорит об эмоциональном настрое человека.

В одном исследовании немецких ораторов попросили выслушать фразы и оценить эмоциональное состояние оратора. Когда участники слышали фразы, высказанные с горечью, они характеризовали состояние человека соответствующим образом. Но когда те же фразы произносились быстрее, состояние говорящего большинство оценивало как испуганное или нейтральное. Важно, что эмоции, передаваемые с помощью интонаций, не имеют языковых ограничений. Когда те же фразы оценивались американцами, не говорящими по-немецки, их выводы были такими же, как у немцев. Аналогичным образом, если речь модифицировали таким образом, что слова становились неразличимы, но общий «контур» речи сохранялся, слушатели по-прежнему могли оценить эмоциональное состояние говорящего. Вы ведь наверняка слышали приглушенные звуки речи, доносящиеся из-за стены: даже если вы не можете разобрать отдельных слов, вы вполне способны оценить, дружеский это разговор или враждебный¹⁰⁵.

СКОРОСТЬ РЕЧИ И ЮМОР

Считается, что скорость речи играет важную роль в комедии. Я не уверен, что это утверждение тщательно проверялось в лаборатории... или на животных, однако актер Саша Барон Коэн чудесным образом продемонстрировал значение ритма речи в фильме «Борат: изучение американской культуры на благо славного народа Казахстана». В одной сцене инструктор по юмору объясняет шутку со словом «не очень». Фраза не очень смешная, но «комический потенциал» у нее есть:

Этот костюм черный. Не очень!

Борат пытается повторить фразу:

Этот костюм не очень черный.

Этот костюм черный не очень.

Этот костюм черный. Не очень!

Согласен, все это не так уж смешно. Но какую роль в этой шутке играет время? Немаловажный фактор – неожиданность. Чтобы получилось весело, фраза должна быть неожиданной, но все же осмысленной. «Костюм черный, черная фасоль!» – звучит неожиданно, но вовсе не смешно¹⁰⁶. Кроме того, неожиданность, по-видимому, должна возникать в совершенно определенный момент. Мозг в режиме реального времени постоянно делает предсказания, *что* должно произойти в ближайшем будущем и *когда* именно: возможно, чтобы было

¹⁰⁵ Breitenstein et al., 2001a; Breitenstein et al., 2001b; Taler et al., 2008.

¹⁰⁶ Brownell and Gardner, 1988.

смешно, неожиданная концовка (кульминация) должна произойти в ожидаемое время. Если концовка происходит слишком рано, сюрприза не будет, поскольку мозг еще не предсказал, что же должно случиться. С другой стороны, если кульминационный момент слишком долго откладывается, слушатель мысленно включается в следующий раунд предсказаний: сюрприз заключается в том, что ничего не происходит, однако это странно, но не смешно.

«ДЕТСКАЯ» РЕЧЬ

Почти любой человек, пытающийся выучить иностранный язык во взрослом возрасте, жалуется, что носители языка говорят слишком быстро¹⁰⁷. Слушать иностранную речь – все равно что пытаться узнать человека на платформе, находясь в движущемся вагоне метро: мозг пытается зацепиться за любое характерное лицо, но все лица сливаются в одно пятно. Замедление речи помогает новичкам выделить из череды фонем отдельные слова.

По-видимому, у детей возникает похожая проблема при изучении родного языка, так что в разговоре с детьми взрослые автоматически замедляют речь и выделяют отдельные слова. Таковую манеру речи называют «детской» речью («motherese»). «Детская» речь характеризуется повышением тона, длинными гласными и увеличенными паузами между словами. Например, когда взрослые люди разговаривают между собой, паузы между фразами обычно составляют около 700 мс, а в разговоре с детьми это значение достигает 1 секунды. Кроме того, как и взрослые, изучающие иностранный язык, дети лучше различают слова, когда они произносятся в замедленном темпе, с сильным нажимом и интонацией «детской» речи¹⁰⁸. Замедление речи помогает детям и взрослым разобрать фразы – понять, где заканчивается одно слово и начинается другое, и не соединять между собой фонемы из разных слов. В следующей главе мы увидим, что это может быть связано с тем, как мозг обрабатывает поток информации и определяет время в диапазоне от десятков до сотен миллисекунд.

Речь многогранна: в ней множество параметров, включая последовательности фонем и интервалы между фонемами, длительность гласных, паузы между словами, интонацию, ударения, скорость и общую просодию. Для восприятия многих из этих параметров мозг слушателя должен уметь отсчитывать время. Аналогичным образом, говорящий тоже должен уметь структурировать речь во временном измерении, орудуя языком, губами и голосовыми связками, выдерживая паузы и сохраняя ритм дыхания. В целом мозг слушателя и говорящего должен решать сложный набор проблем, связанных с отсчетом времени, и эта задача, скорее всего, не под силу простому часовому механизму.

АЗБУКА МОРЗЕ

Мы видим, что люди и животные выполняют целый ряд задач, связанных с отсчетом времени: оценивают интервал между прибытием звука в левое и правое ухо, предвидят переключение сигнала светофора и чувствуют вращение Земли вокруг ее оси. Эти задачи связаны с определением длительности различных интервалов времени – временной эквивалент определения длины предметов. Напротив, восприятие речи и музыки требует распознавания сложных ритмических структур: нужно уметь складывать воедино множество фрагментов временных образов.

Время для восприятия речи и музыки – то же, что пространство для распознавания визуальных образов. Распознавание лица на картине – пространственная задача: необходимая

¹⁰⁷ Aasland and Baum, 2003.

¹⁰⁸ Grieser and Kuhl, 1988; Bryant and Barrett, 2007; Broesch and Bryant, 2015.

информация кроется в пространственном взаиморасположении отдельных элементов рисунка. Но это еще и иерархическая проблема: информация нижнего уровня (прямые и изогнутые линии) интегрированы в общее изображение. Круг – всего лишь круг, но пара расположенных рядом концентрических кругов становится глазами; поместите их в еще один круг, и вы получите лицо, и так далее, пока на картине не появится группа людей.

Речь и музыка – временной эквивалент визуальной картины: для их восприятия необходимо понимать иерархию встроенных временных образов¹⁰⁹. Для распознавания речи нужно уметь отслеживать признаки элементов с различной длительностью: фонем, гласных звуков, слов, фраз и предложений. В каком-то смысле определение иерархии временных образов более сложная задача, чем определение иерархии пространственных образов, поскольку требует использования памяти. Все элементы визуального рисунка одновременно присутствуют на бумаге, а элементы музыки и речи сменяют друг друга во времени, так что каждый элемент необходимо интерпретировать в контексте элементов, уже переместившихся в область прошлого.

Возможно, лучшим примером сложной работы мозга по обработке временных образов является азбука Морзе. Речь и музыка основаны на информации, закодированной в виде временной последовательности звуков, однако немалая доля информации содержится и в высоте звука. Высоту звука можно сравнить с пространственной информацией – с направлением линии на листе бумаги. Может возникнуть небольшая путаница, поскольку высота связана с частотой звука, а частота – одно из физических свойств звука, измеряемых в единицах в секунду (это интервал между повторяющимися колебаниями звуковых волн). Однако звуковые частоты воспринимаются слуховыми клетками (*волосковыми клетками*), расположенными в пространстве улитки уха. Поэтому для центральной нервной системы определение высоты звука является пространственной задачей, сродни поиску клавиш на фортепьяно. Азбука Морзе не зависит от высоты звука и не имеет какой-либо «пространственной» составляющей, поэтому в азбуке Морзе все определяет время.

Азбука Морзе состоит из двух элементов – *точек* и *тире*. Вся разница между ними заключается в длительности, так что для общения с помощью азбуки Морзе нужен единственный коммуникационный канал, по которому звук или свет может проходить в обоих направлениях в соответствии со сложным временным ритмом. Таким кодом легко пользоваться: сообщения можно передавать, просто закрывая глаза на более или менее долгое время. Знаменитый пример – история американского летчика Джереми Дентона, который во время войны во Вьетнаме попал в плен. Его вынудили дать пропагандистское интервью для телевидения, во время которого он рассказывал, что получает нормальное питание, одежду и медицинскую помощь, но при этом несколько раз проморгал слово «torture» (пытка)¹¹⁰.

Длительность точек и тире зависит от общей скорости передачи информации с помощью азбуки Морзе, которая измеряется в количестве слов в минуту. При скорости 10 слов в минуту длительность каждой точки и тире составляет соответственно 120 и 360 мс. Но паузы тоже несут информацию: при такой скорости передачи паузы между буквами составляют 360 мс (в три раза больше длительности точки), а паузы между словами – 840 мс (в семь раз больше длительности точки). Текст

• — — • • • • • — — • • • • • — • • — — •

¹⁰⁹ Bregman, 1990.

¹¹⁰ http://www.washingtonpost.com/national/jeremiah-a-denton-jr-vietnam-pow-and-us-senator-dies/2014/03/28/1a15343e-b50011e3-b899-20667de76985_story.html.

читается как «what is time» (что такое время). Наиболее длинные пробелы соответствуют промежуткам между словами. Вся информация содержится в длительности звуков, интервалов между ними и общей структуре «фраз». Но, как и в речи, здесь тоже есть интонация, и говорят, что по небольшим вариациям длительности эксперты способны уловить «акцент» человека, передающего информацию. Для неопытного уха прослушивание азбуки Морзе напоминает прослушивание речи на незнакомом языке: нельзя понять, когда заканчивается одна буква, и начинается другая. Каждый следующий сигнал просто наслаивается на предыдущий, так что невозможно уловить разницу между последовательностями:

. (she) (она)
И
. (his) (его)

Специалист, конечно же, не должен считать все эти точки и думать о том, где одна буква, а где другая – как вы не должны замирать и думать, был ли произнесен звук «т», позволяющий различить слова «нейрон» и «нейтрон».

Так как же обучаются азбуке Морзе? Постепенно. Никто не начинает обучаться со скоростью 20 слов в минуту: люди начинают работать в медленном темпе, постепенно его наращивая. Например, метод Фарнсуорта заключается в том, что буквы передаются с нормальной скоростью, а вот паузы между буквами и словами удлиняются. Это позволяет выучивать буквы как единые «временные объекты», а удлинение пауз помогает разграничить буквы и слова, чтобы они не накладывались друг на друга¹¹¹. Другими словами, люди учат азбуку Морзе, начиная с «детского» языка Морзе.

УЧИМСЯ ОПРЕДЕЛЯТЬ ВРЕМЯ

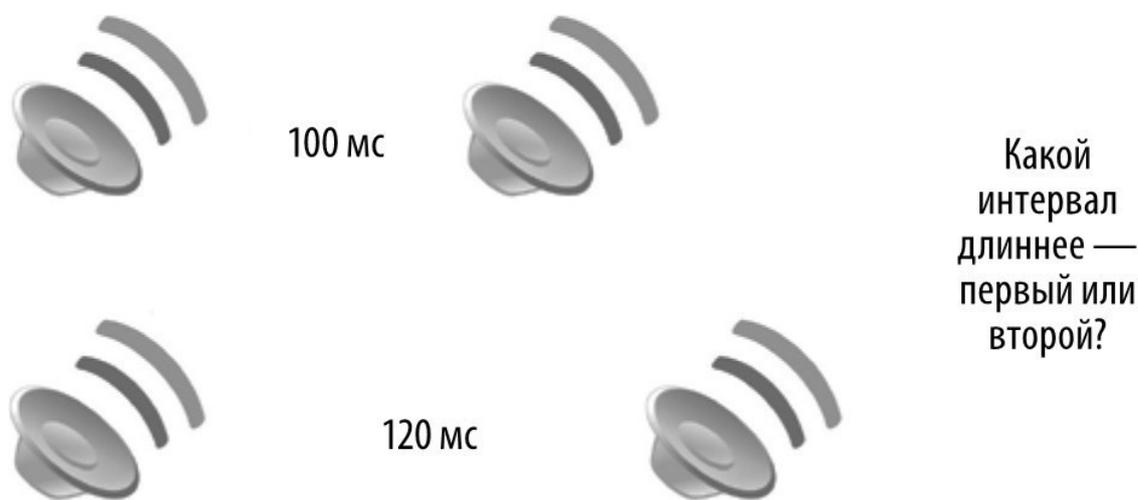
Даже тот, кто никогда не учил азбуку Морзе, легко отличит точку (120 мс) от тире (360 мс). Также и в музыке несложно распознать ноты длительностью одна восьмая (250 мс) и одна четверть (500 мс) при ритме 120 ударов в минуту. Но как это делает мозг? И улучшается ли эта способность с опытом? Поиски ответов на эти вопросы значительно расширяют наше понимание того, как мозг определяет время.

С одной стороны, можно представить себе, что мозг использует некий универсальный нейронный секундомер, работающий в интервале от нескольких миллисекунд до нескольких секунд. Но, с другой стороны, мы уже говорили о том, что мозг должен иметь несколько разных нейронов или сетей нейронов для восприятия разных временных интервалов – коллекцию песочных часов разного объема. Чтобы понять, какая гипотеза правильная, нужно попытаться установить, можно ли с помощью тренировки улучшить восприятие временных интервалов, и если да, то как.

¹¹¹ www.arrl.org/files/file/Technology/x9004008.pdf (7/8/15).

Изучением способности различать интервалы времени начали заниматься еще в конце XIX в., однако окончательный ответ на вопрос о роли практики был получен только в 1990-х гг. Одно из первых систематических исследований на эту тему было проведено в Калифорнийском университете в Сан-Франциско Беверли Райтом, мной и нашими коллегами Генри Манком и Майклом Мерзеничем. Мы проводили стандартный эксперимент по дискриминации¹¹² временных интервалов, в котором просили участников сравнить пару интервалов и ответить, который из них – первый или второй – был длиннее. В этом задании каждый интервал прерывался двумя короткими звуками (по 15 мс каждый). Например, в первом случае это могли быть два звука, разделенные *стандартным интервалом* длительностью 100 мс, а во втором случае два звука разделялись так называемым *интервалом сравнения* длительностью 120 мс (рис. 5.1). Различие в длительности стандартного интервала и интервала сравнения (в данном случае 20 мс) обозначается символом Δt (дельта-t). Если участник эксперимента все время правильно идентифицировал длинные и короткие интервалы длительностью 100 и 120 мс, следовательно, его внутренний таймер имеет разрешение менее 20 мс.

Изменяя значение Δt , можно оценить точность таймеров мозга. Сначала мы оценили пороговые значения для восприятия стандартных интервалов 50, 100, 200 и 500 мс для всех участников. Нужно отметить, что пороговые значения были разными для всех стандартных интервалов, и это общее правило для дискриминации стимулов разной величины. Возможно, вы сумеете определить разницу в весе между двумя предметами массой 100 и 120 грамм, но не между предметами массой 1000 и 1020 грамм. Иными словами, для восприятия важно не абсолютное, а относительное различие между двумя стимулами. Пороговые значения для дискриминации интервалов времени колебались в пределах от 15 до 25%. Например, для стандартного интервала 100 мс среднее значение *порога дискриминации* составляло 24 мс: в среднем люди могут воспроизводимо различить интервалы длительностью 100 и 124 мс. Получив этот первичный опыт в первый день исследований, участники эксперимента прошли десятидневную тренировку, во время которой по часу в день они тренировались различать интервалы времени в этом диапазоне величин. После тренировки показатели улучшились: среднее пороговое значение для стандартного интервала длительностью 100 мс сократилось с 24 до 10 мс. Это означает, что практика каким-то образом улучшает качество таймера, находящегося у нас в голове. Но человек – сложное существо. Возможно, практика не улучшила восприятие времени как таковое, а просто научила людей лучше концентрироваться на выполнении задания. Однако ответ на второй (более интересный) вопрос указал на несостоятельность такой интерпретации.



¹¹² То есть по различению. – Прим. ред.

Рис. 5.1. Задача по дискриминации длительности интервалов времени

Учитывая, что люди смогли улучшить свои результаты в оценке интервалов времени около 100 мс, мы попробовали установить, получится ли это и с другими интервалами. Обратите внимание: если мы считаем, что мозг имеет некий нейронный секундомер, занимающийся отсчетом времени во всем интервале от 50 до 500 мс, и что этот секундомер поддается корректировке практикой, можно было ожидать улучшения показателей в оценке всех интервалов времени, даже если участники тренировались только в интервале длительностью 100 мс. Напротив, если мозг использует специализированные секундомеры для каждого интервала времени, тренировка в интервале 100 мс никаким образом не влияет на точность оценки других временных интервалов. Именно такая ситуация и наблюдалась на практике. Хотя десять дней тренировок значительно улучшили способность людей различать временные интервалы в диапазоне около 100 мс, они никак не изменили пороговые значения для интервалов 50, 200 или 500 мс¹¹³. Если бы улучшение показателей для интервала 100 мс достигалось за счет концентрации внимания, мы бы наблюдали улучшение результатов и в других экспериментах, но этого не произошло. Еще более важно, что этот результат, который с тех пор неоднократно воспроизводился в других исследованиях¹¹⁴, говорит о том, что хотя мозг определяет время в пределах долей секунды, судя по всему, не существует никакого универсального секундомера, который мог бы работать во всем этом интервале.

НАШЕ ЕСТЕСТВЕННОЕ ЖЕЛАНИЕ ПРИХЛОПЫВАТЬ РУКОЙ ИЛИ КАЧАТЬ ГОЛОВОЙ В ТАКТ МУЗЫКИ ЛИШНИЙ РАЗ ГОВОРИТ О ТОМ, ЧТО МОЗГ ЧЕЛОВЕКА УМЕЕТ ПРЕДСКАЗЫВАТЬ. ВЫ ПРИТОПТЫВАЕТЕ НОГОЙ НЕ В ОТВЕТ НА КАЖДЫЙ УДАР КЛАВИШ ИЛИ УДАРНЫХ: ВАШ МОЗГ ЗАГЛЯДЫВАЕТ НА НЕСКОЛЬКО СОТЕН МИЛЛИСЕКУНД ВПЕРЕД, ПРЕДСКАЗЫВАЕТ СЛЕДУЮЩИЙ ТАКТ И СИНХРОНИЗИРУЕТ С НИМ ВАШИ ДЕЙСТВИЯ.

Поскольку точность оценки времени улучшается с практикой, кажется логичным, что люди, профессия которых требует постоянного отслеживания времени (например музыканты), в подобных экспериментах должны показывать более высокие результаты. Одно из первых исследований такого рода было проведено Ричардом Иври и его коллегами, тогда работавшими в Университете Орегона. Исследователи просили пианистов и людей, не имевших отношения к музыке, нажимать на клавишу одновременно со звуковым сигналом, раздававшимся через каждые 400 мс, а затем продолжать делать то же самое в том же ритме, но уже без сигнала. Ритм нажатий на клавишу у музыкантов был гораздо менее вариабельным (более постоянным), чем у не-музыкантов. Аналогичным образом, пианисты показали значительно более точные результаты при оценке временных интервалов порядка 400 мс¹¹⁵. Еще в одном исследовании подтвердилось, что пороги дискриминации для стандартных интервалов 50 и 100 мс у музыкантов были значительно ниже, чем у других людей. Но даже среди музыкантов показатели различались. Например, оказалось, что барабанщики точнее оценивают интервалы времени порядка

¹¹³ Wright et al., 1997. Кроме того, участники эксперимента улучшали показатели в «пространственном» измерении: тренируясь на интервале 100 мс, ограниченном двумя звуками на частоте 1 кГц, они лучше узнавали этот же интервал, ограниченный звуками на частоте 4 кГц. И последующие исследования показали, что после тренировки люди могут переносить полученный опыт на определение того же интервала в другой модальности. Например, тренировка на соматосенсорных стимулах улучшала результаты в распознавании слуховых стимулов (Nagarajan et al., 1998). Я не обсуждаю здесь эти результаты во всех подробностях по той причине, что эта генерализация по различным пространственным каналам, возможно, не всегда связана с обучением. В частности, генерализация по различным интервалам в слуховой модальности происходит лишь после обучения на тренировочных интервалах (Wright et al., 2010).

¹¹⁴ Обзор исследований, показывающих, что обучение распознаванию интервалов зависит от величины интервала: Buetti and Buonomano, 2014.

¹¹⁵ Keele et al., 1985.

1 с, чем исполнители на струнных инструментах¹¹⁶. В целом при выполнении самых разных упражнений по оценке интервалов времени музыканты показывают результаты примерно на 20% точнее, чем не-музыканты.

ДЕРЖИМ РИТМ

В той или иной форме музыка присутствует в любой человеческой культуре. Ключевой элемент музыки – такт, необходимый для поддержания ритма. Наше естественное желание прихлопывать рукой или качать головой в такт музыки лишний раз говорит о том, что мозг человека умеет предсказывать. Вы притоптываете ногой не в ответ на каждый удар клавиш или ударных: ваш мозг заглядывает на несколько сотен миллисекунд вперед, предсказывает следующий такт и синхронизирует с ним ваши действия. Синхронизация наших движений с музыкальным ритмом настолько естественна, что нам проще поддерживать ритм музыки, чем его нарушить. Однако большинство животных не обладают чувством ритма.

Дело не в том, что животные не разделяют нашей любви к музыке, скорее, им не хватает чувствительных и двигательных способностей, необходимых для синхронизации движений с периодическим стимулом. Любители YouTube тут же мне возразят, что интернет переполнен видео с домашними любимцами, радостно подпрыгивающими в такт какой-нибудь поп-музыке. Однако многие из этих животных демонстрируют так называемый «эффект умного Ганса»: они научились распознавать сигналы своих хозяев, как знаменитая лошадь Ганс, решавшая арифметические задачи, реагируя на произвольные подсказки своего хозяина. Но некоторые видео, особенно с участием птиц, могут быть вполне реальными.

Ученые вовсе не отказываются протестировать в экспериментах героев видео. Психолог Анируд Пател и его коллеги поработали со звездой YouTube белым попугаем Снежком¹¹⁷. В одном из видео Снежок выполняет движения телом и головой, которые нельзя назвать иначе, как танцем, под песню «Everybody» группы Backstreet Boys. Чтобы понять, действительно ли Снежок следует ритму или воспроизводит серию заученных движений, исследователи замедляли и ускоряли темп музыки и следили за движениями птицы. Если при каждом такте голова находится примерно в одном и том же положении, можно сказать, что движения синхронизированы с музыкой. Совершенно определенно, при разном темпе музыки движения Снежка были синхронизированы с музыкой, и это означает, что он предвидел следующий такт, хотя, кажется, отдавал предпочтение более быстрому ритму¹¹⁸.

Но птицы – это исключение. Обезьяны способны научиться воспроизводить размеренные движения, но даже простая задача по синхронизации движений и звука им не под силу. В одном исследовании было показано, что даже после года тренировки макаки резус не могли нажимать на кнопку одновременно с периодически повторяющимся звуком, а делали это с небольшой задержкой¹¹⁹.

Почему такая примитивная, казалось бы, задача по поддержанию ритма столь сложна для наших братьев приматов, но не для птиц? Возможный ответ на этот вопрос дает *гипотеза голосового обучения*. Большинство млекопитающих, включая обезьян, собак и кошек, общаются между собой с помощью звуков – крика, рычания, лая или мяуканья, однако эта врожденная способность реализуется с привлечением весьма ограниченного набора «слов». Например, собаке не нужно знать, что рычание не означает «здравствуйте, пожалуйста, подойдите

¹¹⁶ Исследование с интервалами 50 и 100 мс: Rammsayer et al., 2012. Исследование с участием барабанщиков: Cicchini et al., 2012.

¹¹⁷ <https://www.youtube.com/watch?v=utkb1nOJnD4> (7/14/15).

¹¹⁸ Patel et al., 2009.

¹¹⁹ Zarco et al., 2009. См. также Honing et al., 2012.

поближе». Лишь немногие животные обучаются производить специфические звуки в результате жизненного опыта и социальной активности. Кроме человека и некоторых видов птиц, выразаться голосом могут только киты и слоны. Самый известный пример – попугаи, которые способны научиться воспроизводить звуки, издаваемые другими птицами, или имитировать несколько слов из лексикона пиратов.

Для голосового обучения мозг должен слышать звуки и понимать, как их воспроизвести с помощью голосовых связок и мышц голосового аппарата. Совершенно очевидно, что для решения этой задачи необходима хорошая координация между слуховыми и двигательными центрами мозга. Такая же координация нужна для синхронизации движений с периодическими звуковыми стимулами. Возможно, та же сеть нейронов, которая помогает животным обучаться голосовому общению, объясняет их способность следовать музыкальному ритму¹²⁰.

ОБЕЗЬЯНЫ СПОСОБНЫ НАУЧИТЬСЯ ВОСПРОИЗВОДИТЬ РАЗМЕРЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ, НО ДАЖЕ ПРОСТАЯ ЗАДАЧА ПО СИНХРОНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ И ЗВУКА ИМ НЕ ПОД СИЛУ. В ОДНОМ ИССЛЕДОВАНИИ БЫЛО ПОКАЗАНО, ЧТО ДАЖЕ ПОСЛЕ ГОДА ТРЕНИРОВКИ МАКАКИ РЕЗУС НЕ МОГЛИ НАЖИМАТЬ НА КНОПКУ ОДНОВРЕМЕННО С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМСЯ ЗВУКОМ, А ДЕЛАЛИ ЭТО С НЕБОЛЬШОЙ ЗАДЕРЖКОЙ.

Речь и музыка – активные занятия, заставляющие мозг постоянно предсказывать, что сейчас произойдет. В частности, для восприятия музыки нужно предчувствовать, какая нота и в какой момент прозвучит: оправдается это ожидание или нет, зависит от намерения композитора¹²¹. Таким образом, не удивительно, что для восприятия музыки необходимо как минимум иметь возможность следовать ритму, а синхронные движения в ответ на периодический стимул как раз и являются одним из основных критериев оценки предсказательной способности.

ПЕВЧИЕ ПТИЦЫ

Птицы не только танцуют, некоторые умеют еще и петь. По крайней мере, *нам* кажется, что они поют: на самом деле, они общаются друг с другом. В обучении человека языку и обучении птиц пению можно найти несколько параллелей. По этой причине певчие птицы стали важной моделью в исследовании таких вопросов, как обучение, общение, речь и отсчет времени¹²².

Ухаживая за самкой, самцы зебровой амадины исполняют сложные песни. Молодые самцы обучаются этому у взрослых самцов, но могут также обучаться путем прослушивания аудиозаписей их песен. Как и в обучении человека, существует критический отрезок времени, во время которого птицы учатся владеть голосом. Если этот период на ранней стадии развития упущен, певчая птица никогда не научится нормально воспроизводить взрослую песню: самец, который никогда не слышал пения другого самца, сможет петь, но качество его пения вряд ли привлечет какую-нибудь самку.

В пении птиц, как в речи и музыке, существует временная иерархия элементов. Ноты складываются в слоги, а последовательность слогов формирует фразы. Один слог может длиться до нескольких сотен миллисекунд, длительность пауз между слогами обычно не превышает 100 мс, а песня целиком может звучать несколько секунд.

¹²⁰ Patel, 2006; Patel et al., 2014.

¹²¹ Meyer, 1961.

¹²² Doupe and Kuhl, 1999.

Устройство мозга самца и самки зебровой амадины заметно различается: у самцов есть несколько зон, необходимых для пения и обучения пению (самки амадины не поют). Один такой центр носит название HVC (не спрашивайте, что это значит, просто обозначение). Этот центр, по крайней мере отчасти, отвечает за ритм пения амадины. Нейроны в центре HVC возбуждаются в определенные моменты в процессе пения: например, один нейрон может возбуждаться на 100-й мс фразы, а другой – на 500-й¹²³. Можно себе представить цепь нейронов, в которой нейрон А активирует нейрон В, который затем активирует нейрон С и т. д. (рис. 5.2). В результате после возбуждения нейрона А происходит цепная реакция возбуждения нейронов $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ (на самом деле, каждое звено в этой цепи соответствует не одному нейрону, а целой группе нейронов).

Представьте себе, что вы используете в качестве таймера стопку падающих костяшек домино: если каждая костяшка падает через 100 мс после предыдущей, а затем все они возвращаются в исходное положение, можно подсчитать, что пятая костяшка падает примерно через 500 мс от начала отсчета, а десятая – примерно через одну секунду. Аналогичным образом, в соответствии с одной теорией (мы подробнее поговорим об этом в следующей главе), в некоторых случаях мозг узнает время по тому, какой именно нейрон в цепи возбужден в данный момент. По-видимому, нейроны HVC в мозге птиц используют этот механизм для поддержания ритма пения.

Однако одна из постоянных проблем нейробиологии заключается в разграничении корреляции и причинности: нам кажется, что нейроны HVC отвечают за пение, но мы не уверены, что именно в этом состоит их функция. Пытаясь решить проблему корреляции и причинности, нейробиологи Майкл Лонг и Майкл Фи, работавшие в Массачусетском Технологическом институте, предположили, что если нейроны HVC определяют ритм пения, замедление активности этих нейронов должно приводить к замедлению ритма песни¹²⁴.

Замедление активности группы нейронов – дело тонкое, но выполнимое за счет изменений локальной температуры конкретного участка мозга. Охлаждение биологической ткани обычно замедляет скорость метаболизма в этом участке. Нейроны не являются исключением. Например, у холоднокровных животных скорость прохождения потенциала действия по аксону и даже длительность самого потенциала действия зависят от внешней температуры (это одна из причин, почему теплокровные животные обычно имеют более быстрые рефлексy, чем холоднокровные).

Чтобы понизить температуру в области HVC, Лонг и Фи встраивали в мозг птиц крошечный охлаждающий элемент. Это позволяло понижать температуру этого центра во время пения на пять или шесть градусов по сравнению с температурой остального тела (чтобы заставить самцов петь, в соседние клетки помещали самок). Результат был однозначным. Охлаждение области HVC приводило к замедлению песенного ритма. Важно, что это замедление ритма одинаково сказывалось на всех элементах песни: отдельные ноты, слоги, паузы и длительность всей фразы целиком растягивались одинаковым образом, вплоть до 40%. В качестве контрольного эксперимента исследователи охлаждали двигательный центр, который тоже важен для пения (эта зона получает сигнал от HVC). Охлаждение этого центра не влияло заметным образом на ритм пения, и это означает, что эффект замедления ритма вызван замедлением активности *внутри* нейронов HVC, а двигательный центр находится в данном случае в подчиненном положении.

¹²³ Hahnloser et al., 2002; Long et al., 2010.

¹²⁴ Long and Fee, 2008.

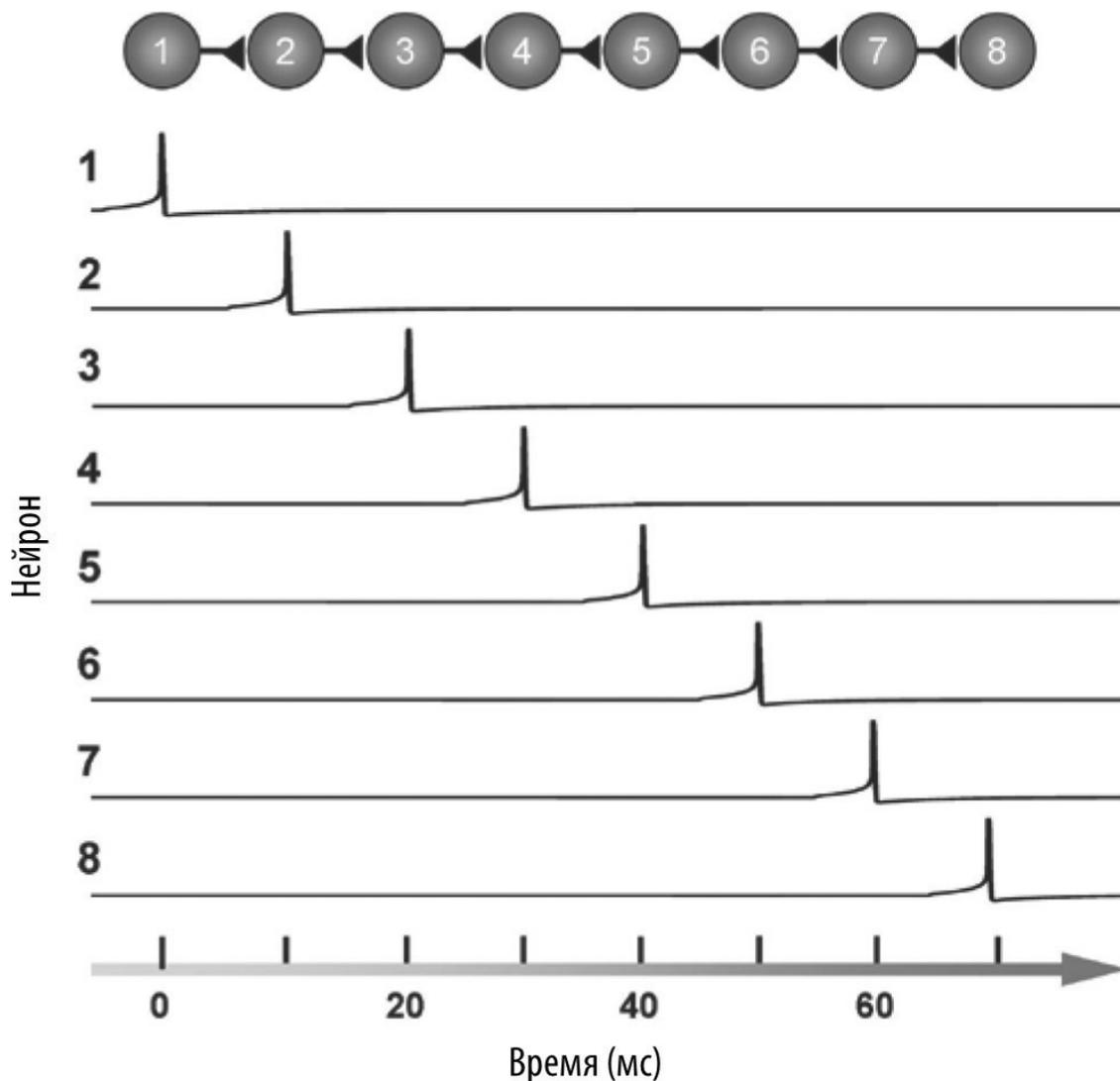


Рис. 5.2. Цепь синхронного возбуждения нейронов. В модели цепи синхронного возбуждения отдельные нейроны (или группы нейронов) связаны между собой упреждающим образом. Возбуждение нейронов (потенциал действия, характеризующийся пиками напряжения) распространяется по цепи, как стопка падающих костяшек домино. Время от начала возбуждения первого нейрона можно определить по номеру нейрона, возбужденного в текущий момент времени.

В отношении ритма птичьего пения остается еще множество неразрешенных вопросов, но описанные выше эксперименты доказывают, что одна-единственная область мозга может влиять на временные показатели сложных поведенческих реакций или даже ими управлять.

НЕЙРОАТОМИЯ ВОСПРИЯТИЯ ВРЕМЕНИ

Электрофизиологические исследования животных и человека показывают, что в мозге нет какой-либо универсальной сети нейронов, управляющей определением времени в диапазоне от сотен миллисекунд до нескольких секунд. Скорее, в мозге трудно найти такую область, которая тем или иным образом не участвовала бы в отсчете времени¹²⁵. Очевидно, что любая

¹²⁵ Garcia and Mauk, 1998; Mauk and Buonomano, 2004; Shuler and Bear, 2006; Livesey et al., 2007; Coull et al., 2011; Buetti et al., 2012; Kim et al., 2013; Merchant et al., 2013; Crowe et al., 2014; Eichenbaum, 2014; Goel and Buonomano, 2014; Mello et

версия стратегии универсальных руководящих часов не выдерживает критики, но это не означает, что в мозге нет участков, ответственных за какие-то специфические формы отсчета времени. У певчих птиц за ритм пения, по-видимому, отвечает центр HVC. Как мы увидим в следующей главе, у млекопитающих важную роль в некоторых вариантах мониторинга времени играет мозжечок.

В дискриминации временных интервалов участвуют определенные зоны мозга, в том числе базальные ядра (скопления серого вещества, находящиеся под корой мозга) и дополнительная моторная область (область, прилегающая к моторной коре, участвующей в осуществлении двигательной функции)¹²⁶. Но пока мы не можем сказать, могут ли эти области мозга определять время или только передают информацию, т. е. являются ли они эквивалентом кристалла кварца или цифрового дисплея часов. Кроме того, исследования такого рода не позволяют понять, *каким образом* сети нейронов мозга определяют время.

Как следует из теоретических и экспериментальных работ, выполненных в нашей лаборатории и в ряде других мест, хотя специфические сети нейронов мозга отвечают за отсчет времени в определенных процессах, большинство сетей нейронов по своей природе способны определять время. В зависимости от характера задачи (например, хронометраж сенсорной или двигательной функции, определение интервалов времени или временных образов, а также отсчет времени в диапазоне долей секунд или секунд) главную роль могут играть разные сети нейронов. Так, нейроны слухового аппарата могут быть отчасти ответственны за дискриминацию четвертой и восьмой доли музыкальной ноты, нейроны зрительного аппарата – за дискриминацию изображения точек и тире азбуки Морзе, нейроны двигательного аппарата – за подачу сигнала SOS с помощью азбуки Морзе, а базальные ядра – за предвидение времени переключения сигнала светофора.

Идея о том, что расчетом времени в той или иной степени занимается большинство нейронных сетей, подвела нас к вопросу: *не может ли изолированная часть коры мозга, содержащаяся в лабораторных условиях, определять время?*

Ученые умеют поддерживать в живом виде *in vitro* («в чашке») не только клетки крови, сердца или печени, но также и клетки коры головного мозга, например, крыс или мышей. Эти фрагменты коры, содержащие десятки тысяч нейронов, можно поддерживать в живом состоянии на протяжении недель или месяцев. Обычно клетки помещают в термостат, где они не имеют никакого контакта с внешним миром.

Хоуп Джонсон и Эну Гоэль из нашей лаборатории попытались выяснить, что произойдет, если эти клетки подвергнуть воздействию какого-то временного сигнала. Изменится ли как-нибудь их состояние? Смогут ли нейроны «выучить» специфический интервал? В одной серии экспериментов срезы слуховой коры мозга крыс подвергали воздействию электрических стимулов с интервалами 100, 250 и 500 мс на протяжении нескольких часов¹²⁷. В норме мозг получает сигналы от органов чувств, но у нейронов в чашке нет возможности получать сигналы из внешнего мира. Чтобы в условиях *in vitro* обеспечить нервные клетки чувственной информацией, использовались металлические электроды, которые провоцировали краткосрочный электрический шок и вызвали возбуждение небольшого количества нейронов. Через 100, 250 или 500 мс Эну Гоэль посылала следующий сигнал, в этот раз в виде импульса света, который тоже вызывал возбуждение части нейронов.

В обычной ситуации, естественно, нейроны не реагируют на свет (за исключением фоторецепторных клеток глаза), поскольку у них нет для этого необходимых пигментов. Однако с помощью так называемых оптогенетических методов можно заставить нейроны в чашке воз-

al., 2015.

¹²⁶ Wiener et al., 2010; Coull et al., 2011; Merchant et al., 2013; Coull et al., 2015.

¹²⁷ Johnson et al., 2010; Goel and Buonomano, 2016.

буждаться в ответ на световой сигнал (в клетку встраивают ген, кодирующий светочувствительный белок)¹²⁸.

В результате эти нейроны коры имели очень ограниченный контакт с внешним миром, и все, что они испытывали, происходило через одинаковые интервалы времени 100, 250 или 500 мс. Вопрос заключался в том, повлияет ли каким-то образом это воздействие на поведение нервных клеток. Срезы нервной ткани часто отвечают на краткий электрический импульс взрывом активности, длящейся до нескольких сотен миллисекунд. Это происходит по той причине, что нейроны, напрямую активированные током, активируют другие нейроны, те, в свою очередь, активируют следующие и т. д., пока волна активности не утихнет.

Эта активность – характеристика внутренней динамики сети. В зависимости от интервала времени, на котором «тренировали» ткань, эта внутренняя динамика имела разные характеристики. При тренировке на коротком интервале активность длилась недолго, при тренировке с интервалами 250 или 500 мс средняя продолжительность активности постепенно удлинялась. Таким образом, мало того, что в результате тренировки изменялась внутренняя динамика ткани, эта динамика адаптировалась к временному интервалу, на котором происходила тренировка.

Исследования, проведенные в лаборатории Маршалла Шулера в Университете Джонса Хопкинса, показали, что клетки зрительной коры мозга в условиях *in vitro* тоже «обучались» распознавать интервалы времени¹²⁹. Возможная интерпретация этих результатов заключается в том, что даже в чашке нейронные сети коры способны в каком-то смысле обучаться распознавать время.

Эти исследования *in vitro* подтверждают идею о том, что отсчет времени в диапазоне сотен миллисекунд осуществляется не какими-то специализированными сетями нейронов, а является природным свойством сетей нейронов в целом.

Людей часто интересует, существуют ли какие-то неврологические нарушения, связанные с потерей способности определять время. Ответ на этот вопрос зависит от того, о каких интервалах времени идет речь. Мы уже упоминали случай Клайва Уэринга, который потерял способность отсчитывать время в пределах минут и поэтому все время считал, что только что проснулся. Это понятно. Даже если у нас на стене висят часы, мы не сможем с их помощью определить, что прошел час, если не помним, когда он начался. Но поскольку Уэринг сохранил способность исполнять музыку, понимать речь и говорить, значит механизм отсчета времени в диапазоне сотен миллисекунд не пострадал. Кроме того, как и знаменитый пациент Н. М.¹³⁰, страдавший амнезией, Уэринг может точно воспроизводить интервалы в несколько секунд¹³¹. У Уэринга и Н. М. нарушена способность создавать новые долгосрочные воспоминания (точнее, воспоминания о фактах или эпизодах собственной жизни).

Такие нарушения позволяют понять, как мозг накапливает воспоминания. Поэтому вполне естественно задать вопрос, существуют ли специфические нарушения, затрагивающие способность человека определять время в диапазоне нескольких секунд. Ответ на этот вопрос отрицательный. Мы не знаем неврологических нарушений, при которых человек *одновременно* теряет способность оценивать музыкальный ритм, узнавать интервалы времени в пределах нескольких секунд и учиться моргать в такт музыке. И таких нарушений быть не должно, поскольку разные временные задачи решаются разными сетями нейронов головного мозга.

¹²⁸ Следует уточнить, что фоторецепторные клетки глаза не активируются светом. На самом деле, свет их «отключает», а «включены» они в темноте.

¹²⁹ Chubykin et al., 2013.

¹³⁰ Генри Молисон (1926–2008) страдал от расстройства памяти после того, как в 1953 году для излечения эпилепсии у него были хирургически удалены части гиппокампа и миндалевидного тела. Мозг Молисона был предметом научных исследований до самой его смерти. – *Прим. ред.*

¹³¹ Richards, 1973.

Предметы – это физические тела, которые можно увидеть или потрогать, но сам мозг не может ничего увидеть или потрогать напрямую. Все знания о внешнем мире он получает в виде профилей потенциалов действия, создаваемых в одном из пяти органов чувств. С помощью этих профилей мозг обучается идентифицировать реальные физические сущности, такие как лазерный меч или плод папайи. Подобные предметы в каком-то смысле существуют вне времени, их можно идентифицировать по «моментальному снимку». Однако многие элементы внешнего мира имеют временную составляющую: движение руки, рябь на воде, буква ... («s» в азбуке Морзе), запоминающаяся мелодия, взмах крыльев летучей мыши и сами слова «взмах» и «летучая мышь». Все это временные «сущности». Чтобы обнаружить и воспроизвести такие предметы или сущности, мозг должен уметь определять время и хронологию событий.

ОБЕЗЬЯНЫ СПОСОБНЫ НАУЧИТЬСЯ ВОСПРОИЗВОДИТЬ РАЗМЕРЕННЫЕ ДВИЖЕНИЯ, НО ДАЖЕ ПРОСТАЯ ЗАДАЧА ПО СИНХРОНИЗАЦИИ ДВИЖЕНИЙ И ЗВУКА ИМ НЕ ПОД СИЛУ. В ОДНОМ ИССЛЕДОВАНИИ БЫЛО ПОКАЗАНО, ЧТО ДАЖЕ ПОСЛЕ ГОДА ТРЕНИРОВКИ МАКАКИ РЕЗУС НЕ МОГЛИ НАЖИМАТЬ НА КНОПКУ ОДНОВРЕМЕННО С ПЕРИОДИЧЕСКИ ПОВТОРЯЮЩИМСЯ ЗВУКОМ, А ДЕЛАЛИ ЭТО С НЕБОЛЬШОЙ ЗАДЕРЖКОЙ.

Определение начала озвончения фонемы, длительности музыкальной ноты или разницы между точкой и тире в азбуке Морзе требуют распознавания очень коротких временных интервалов – все это деревья в лесу. Но речь, музыка и сообщения, переданные с помощью азбуки Морзе, – это уже гораздо более пространственный пейзаж, разглядеть который можно только во временном диапазоне от десятков миллисекунд до нескольких секунд. Вне этого временного окна речь и музыка не существуют. Ускорьте или замедлите музыку слишком сильно, и она перестанет быть музыкой. Начните говорить слишком быстро, и фонемы сольются друг с другом, слишком медленно – и они изменятся до неузнаваемости, и слушатели станут забывать предыдущие фонемы и предыдущие слова предложения. Время в диапазоне долей секунды – это «зона обитаемости» для обработки временных образов, именно здесь мы можем различить одновременно и лес, и деревья.

Без возможности различать сложные временные образы мы не владели бы двумя характерными для человека способностями: говорить (слушать) и создавать музыку. Но как мозг решает сложные проблемы отсчета времени, связанные с восприятием речи и музыки? Как мозг отмеряет длительность слогов и определяет ритм песни?

6:00

ВРЕМЯ, ДИНАМИКА АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ И ХАОС

*Что такое часы? Примитивное субъективное чувство течения времени позволяет нам упорядочить наши впечатления, судить о том, что одно событие происходит раньше, другое – позднее. Но чтобы показать, что промежуток времени между двумя событиями равен 10 секунд, нужны часы. Благодаря применению часов понятие времени становится объективным. В качестве часов может быть использовано любое физическое явление, если только оно может быть повторено столько раз, сколько необходимо¹³².
ЭЙНШТЕЙН И ИНФЕЛЬД¹³³*

Часы, сделанные человеком, действуют по удивительно простому принципу – считают число циклов осциллятора¹³⁴. Устройство осциллятора может быть самым разным – качающийся маятник, вибрирующий кристалл кварца, циклы «вибрации» электромагнитного излучения, но суть одна: такие часы просто считают циклы периодических процессов. Учитывая невероятную успешность этой стратегии, невольно задумаешься о том, что мозг для определения времени мог бы использовать аналогичный механизм.

Пожалуй, это искушение слишком велико.

Самая популярная теория, объясняющая механизм отсчета времени мозгом в диапазоне от миллисекунд до секунд, называется *моделью внутренних часов*; впервые эта теория была выдвинута в начале 1960-х гг.¹³⁵ Как следует из названия, данная модель предполагает, что часы мозга работают по тому же принципу, что и часы, сделанные человеком: нейроны или группы нейронов пульсируют с какой-то фиксированной частотой, а другая группа нейронов считает эти пульсации. Это кажется вполне реалистичным, тем более что многие нейроны действительно осциллируют – возбуждаются снова и снова через определенные интервалы времени. Вообще говоря, мозговые волны, дыхание, ходьба и сердцебиение – примеры ритмичных биологических процессов, основанных на биологических осцилляциях с периодом от десятков миллисекунд до нескольких секунд.

Но в часах, сделанных руками человека, кроме хорошего осциллятора есть еще механизм, способный подсчитывать осцилляции – шестеренки в механических часах или цифровые схемы в кварцевых часах. Здесь-то и кроется проблема: хотя нейроны могут быть прекрасными осцилляторами, в подсчетах они не сильны.

ОТСЧЕТ ВРЕМЕНИ В ДИАПАЗОНЕ НИЖЕ И ВЫШЕ ПЕРИОДА ОСЦИЛЛЯЦИЙ

Возможно, вы сейчас думаете: *подождите-ка, мы уже видели, что циркадные ритмы основаны на действии биологического осциллятора, работающего по принципу саморегули-*

¹³² Перевод С. Суворова. – Прим. перев.

¹³³ Einstein and Infeld, 1938/1966, 180.

¹³⁴ Осциллятор – любая система, те или иные характеристики которой периодически повторяются во времени. – Прим. ред.

¹³⁵ Creelman, 1962; Treisman, 1963. В 1970-х и 1980-х гг. появились более сложные варианты модели внутренних часов. Наиболее влиятельной была теория скалярного ожидания (SET), которая учитывает наличие не только внутренних водителей ритма (пейсмекеров), но и элементов, которые хранят и сравнивают длительность сигналов, а также механизмов, учитывающих роль концентрации внимания для определения времени (Gibbon, 1977; Gibbon et al., 1984).

ющейся транскрипционно-трансляционной петли обратной связи. Более того, как мы только что отметили, ритм дыхания, сердцебиения или ходьбы тоже основан на действии осцилляторов. Так что для отсчета времени организм действительно использует тот же принцип, что заложен в основу работы механических или кварцевых часов! Однако такая линия рассуждений справедлива лишь отчасти, поскольку существует одно важное различие между вышеуказанными физиологическими процессами и работой часов, изготовленных человеком. В приведенных выше примерах интервалы времени, измеряемые «биологическими часами», *меньше или равны периоду осцилляций*, тогда как для часов, изготовленных человеком, ситуация обратная: такие часы способны определять время только в диапазоне времени, *превышающем период осцилляций*. Биологические осцилляторы обычно хронометрируют события, длительность которых *меньше периода колебаний*, а часы, изготовленные руками человека, работают с отрезками времени, длительность которых *превышает период колебаний*.

Молекулярный механизм циркадного ритма, обсуждавшийся в главе 3, имеет период около 24 ч. Концентрация белков циркадного ритма, таких как Period, соответствует фазам этого 24- часового цикла (например, утро, день, ночь). Но циркадные часы наших супрахиазматических ядер не имеют ни малейшего представления о том, сколько дней прошло с того или иного момента времени! Каждый день показатели этих «часов» возвращаются к нулевому значению; представьте себе маятник, не связанный ни с каким часовым механизмом: глядя на него, нельзя установить, сколько колебаний он уже совершил.

Аналогичным образом осцилляции нейронов, обеспечивающие дыхание, позволяют дышать с более или менее регулярной частотой, скажем, 0,25 Гц (каждые 4 с). Для каждого цикла вдоха и выдоха необходимо совершить ряд хронометрированных движений. Поэтому можно сказать, что нервные центры, контролирующие дыхание, отсчитывают время в пределах 4 с, но после этого механизм вновь возвращается в исходное положение¹³⁶. Сети нейронов, контролирующие дыхание, не имеют никакого представления о том, совершили ли они тысячу, миллион или миллион и один цикл дыхательных движений.

Сети нейронов интегрируют временную информацию (количество осцилляций), но не обладают точностью и памятью часов с маятником или цифровых сетей кварцевых или атомных часов. После тренировки человек может различить интервалы времени длительностью 100 и 105 мс. Но чтобы обнаружить эту разницу в 5 мс, осциллятор должен работать с частотой 200 Гц, а приемное устройство должно уметь отличать 20 осцилляций от 21, что весьма непросто, учитывая механизм действия нейронов. Вполне в соответствии с этими теоретическими рассуждениями у нас совсем немного экспериментальных данных, которые подтверждали бы справедливость модели внутренних часов.

Однако отсутствие экспериментальных данных в поддержку модели внутренних часов вовсе не означает, что осцилляции нервных клеток мозга не связаны с хронометрированием событий, длящихся дольше периода колебаний. Например, было выдвинуто предположение, что некоторые формы определения времени могут основываться на активности нейронов, осциллирующих с разной частотой. При таком сложном механизме осцилляций разные субпопуляции нейронов с какой-то периодичностью синхронизируются, но в остальное время действуют не в фазе. Расчеты показывают, что путем определения этих синхронных пульсаций модель нейронных осцилляций позволяет дискриминировать интервалы времени меньше периода колебаний любой группы осцилляторов¹³⁷.

Как мы уже обсудили, отсчет времени в диапазоне от сотен миллисекунд до нескольких секунд играет для нас очень важную роль. Речь идет не только о чрезвычайно точном определении интервалов между событиями, но и об оценке контекста, учете временной иерархии

¹³⁶ Feldman and Del Negro, 2006.

¹³⁷ Miall, 1989; Matell and Meck, 2004; Buhusi and Meck, 2005.

и восприятию временных образов. В этой «зоне обитаемости» мы можем оценивать длительность событий и длительность промежутков между ними, а также отслеживать общую структуру последовательности фонем, музыкальных звуков, точек и тире азбуки Морзе. По этой причине для объяснения принципов отсчета времени в диапазоне от нескольких миллисекунд до нескольких секунд нам следует заглянуть за пределы общепринятой теории осциллирующих нейронов.

КРУГИ НА ВОДЕ

Посмотрите на разбегающиеся по воде круги, образованные двумя каплями дождя (рис. 6.1). Какая капля упала первой? Одна из задач данной главы заключается в том, чтобы продемонстрировать, что для определения времени теоретически подходит любое физическое явление, которое можно повторить воспроизводимым образом (об этом нам напоминает цитата из книги Эйнштейна и его коллеги Леопольда Инфельда, использованная в качестве эпиграфа к данной главе).

Если все капли дождя падают на поверхность воды с одинаковым импульсом, все они создают примерно одинаковые серии концентрических кругов. Эти круги – пример *пространственно-временного рисунка*: пространственного образа, изменяющегося во времени. Моментальный снимок этого рисунка в любой момент времени не только показывает, какая капля упала раньше, но и позволяет (с применением несложной математики) рассчитать интервал времени между падением капель.

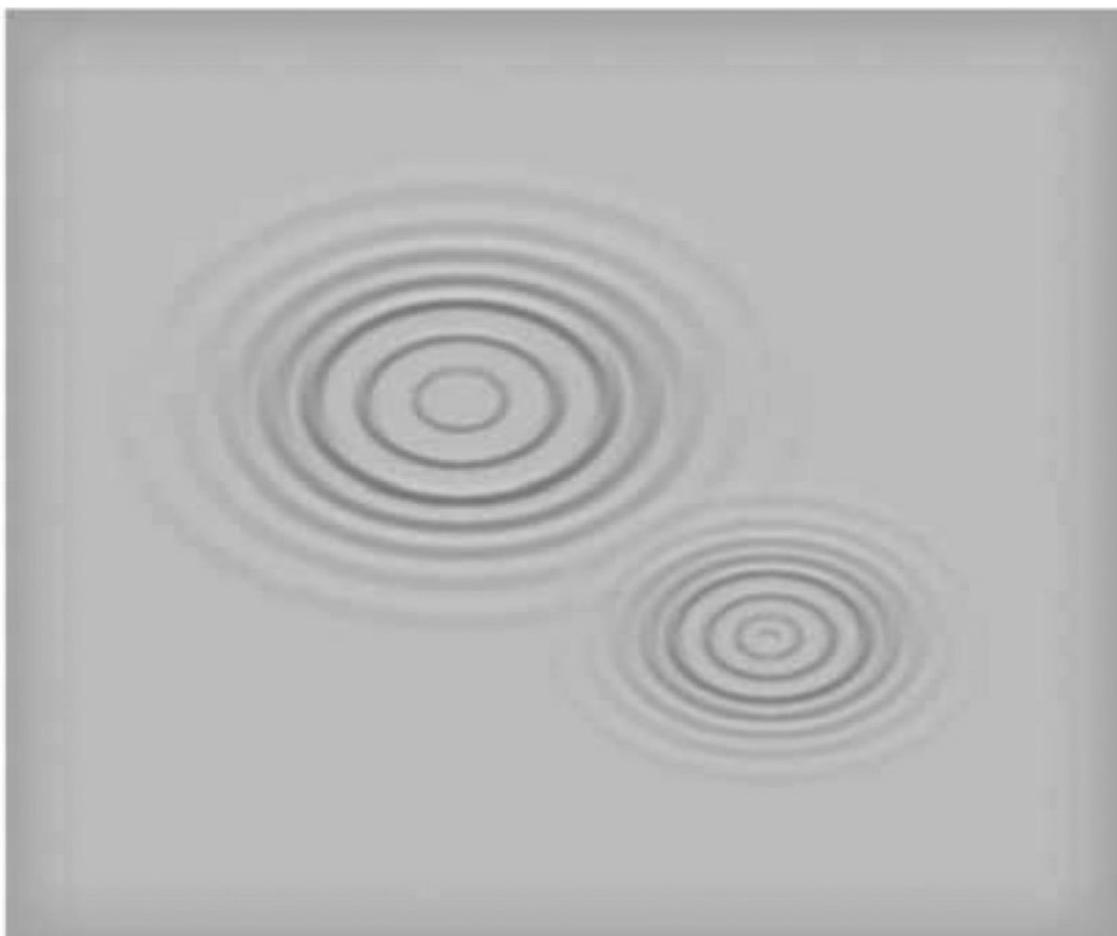


Рис. 6.1. Круги на воде. По определению динамические системы – это системы, состояние которых зависит от фактора времени. Глядя на эту фотографию, легко определить, какая капля упала первой, и можно оценить интервал времени между падением двух капель.

Давайте рассмотрим еще один простой пример изменяющейся во времени системы, которую теоретически можно использовать для определения времени. Представьте себе ребенка, спускающегося с водяной горки в бассейне: если каждый раз он начинает спускаться с одного и того же места, он достигает дна примерно через один и тот же промежуток времени. Мы можем пометить отрезки, которые ребенок проезжает за одну секунду: вверху эти отрезки будут короче, внизу – длиннее, поскольку скорость движения увеличивается. В результате, по мере того как ребенок пересекает каждую следующую линию, можно определить, сколько времени прошло от момента старта.

Таймер «ребенок на горке» запускается силой тяжести, как водяные или песочные часы. Возможно, такие часы кажутся вам не очень точными, но знайте, что восемь сильнейших спортсменов в соревнованиях по скоростному спуску на лыжах во время Зимней Олимпиады 2014 г. показали результаты с разницей в пределах полсекунды – от 2:06:75 до 2:06:23. Эта точность (погрешность менее 0,4%) выше точности любых часов, изобретенных до маятника Гюйгенса.

КРАТКОВРЕМЕННАЯ СИНАПТИЧЕСКАЯ ПЛАСТИЧНОСТЬ

В большинстве физических систем (спускающийся с горы лыжник, скатывающийся с горки мяч, биохимическая реакция в клетке, круги на воде) развитие процессов во времени определяется законами физики, т. е. эти системы теоретически можно использовать для определения времени. Головной мозг – самая сложная на свете динамическая система, так что кажется логичным, что для определения времени мозг использует протекающие в нем самом динамические процессы. Ведь каждый раз, когда нейрон возбуждается, в нем запускается серия воспроизводимых изменений, во многом напоминающих изменения, вызываемые падением дождевой капли в пруд.

В главе 2 мы обсуждали, что нейроны соединены друг с другом через синапсы, и что сила синапса определяет степень влияния пресинаптического нейрона на постсинаптический нейрон. Более того, сила синапсов может меняться (слабый может стать сильным), и это явление синаптической пластичности – один из механизмов, позволяющих мозгу воспринимать и хранить информацию.

Нейробиологи упрощают ситуацию, когда говорят, что в отсутствие обучения сила синапсов остается более или менее постоянной. Большинство синапсов становятся сильнее или слабее при каждом использовании, т. е. после каждого пресинаптического «спайка». Такие зависимости от использования изменения силы синапса называют *кратковременной синаптической пластичностью*; они длятся во временном диапазоне от десятков миллисекунд до нескольких секунд¹³⁸.

Некоторые синапсы коры головного мозга испытывают кратковременную *фасилитацию* (облегчение); например, если пресинаптический нейрон последовательно генерирует два «спайка» с интервалом 100 мс, второй «спайк» приводит к более сильному изменению потенциала постсинаптического нейрона, чем первый (рис. 6.2), так что «вес» сообщения, переданного пресинаптическим нейроном постсинаптическому нейрону, увеличивается.

¹³⁸ Zucker, 1989; Zucker and Regehr, 2002.

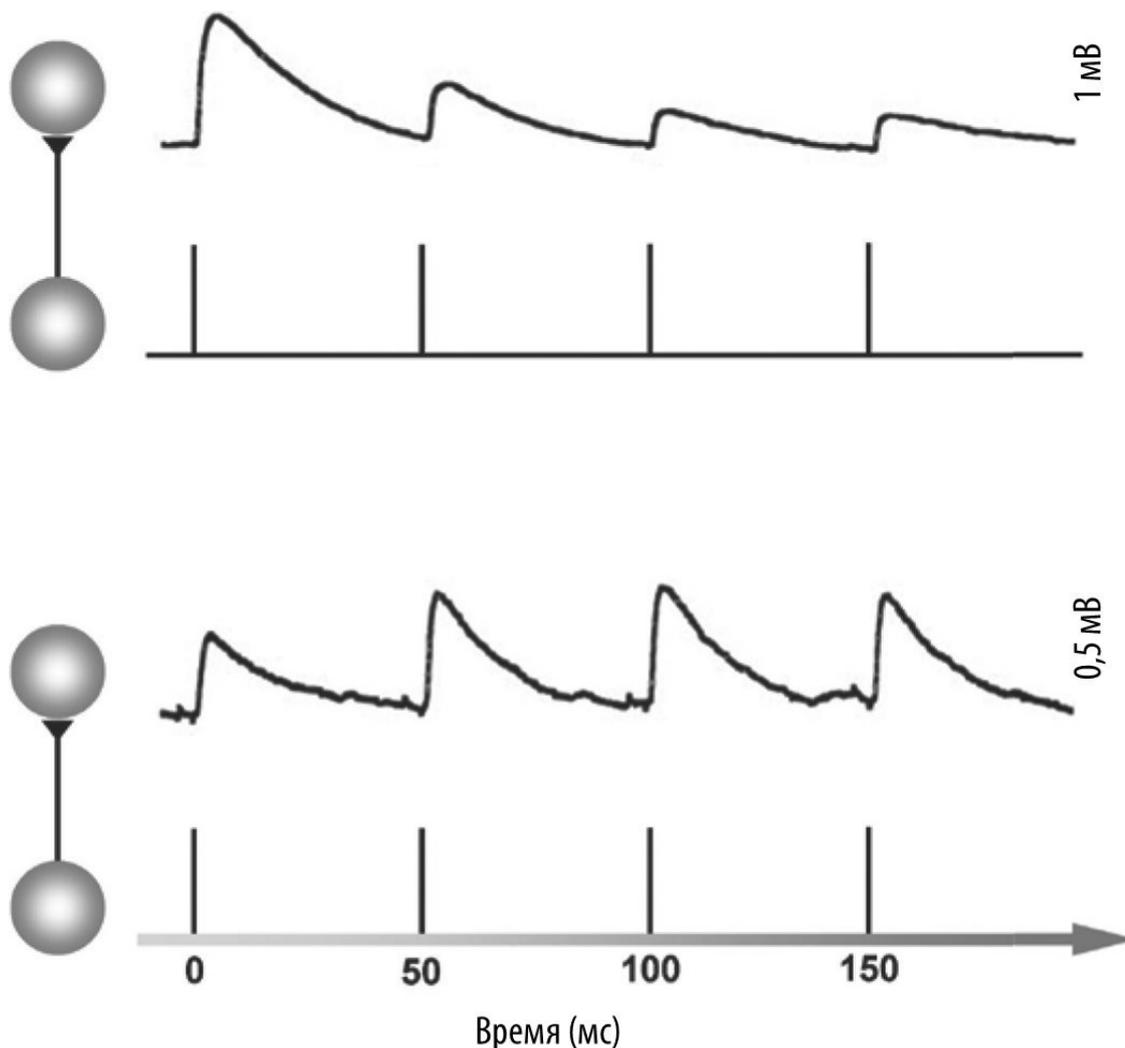


Рис. 6.2. Кратковременная синаптическая пластичность. В диапазоне миллисекунд сила синапса может испытывать кратковременную депрессию (вверху) или кратковременную фасилитацию (внизу); воспроизводится в соответствии со статьей Reyes and Sakmann, 1999.

Однако большинство синапсов коры испытывают кратковременную *депрессию*: второй «спайк» из пары «спайков», возникших с интервалом 100 мс, вызовет меньшее изменение потенциала в постсинаптическом нейроне.

Но в любом случае степень изменения потенциала зависит от времени между «спайками». Обычно максимальный эффект достигается при промежутке времени меньше 100 мс, и практически исчезает, если «спайки» разделены во времени несколькими сотнями миллисекунд. Следовательно, подобно тому, как диаметр внешнего кольца от капли воды, упавшей на поверхность пруда, содержит информацию о том, как давно упала капля, так сила синапса в любой момент времени содержит информацию о том, как давно этот синапс использовался в последний раз.

Мы предположили, что кратковременная синаптическая пластичность и другие зависимости от времени свойства нейронов могут вносить вклад в способность мозга определять время в диапазоне порядка сотен миллисекунд¹³⁹. Давайте рассмотрим простейшую сеть нейронов: два нейрона, соединенные единственным синапсом (рис. 6.3). Допустим, что пресинаптический нейрон возбуждается в одном из трех возможных режимов, когда два пиковых потенци-

¹³⁹ Buonomano and Merzenich, 1995; Buonomano, 2000. См. также Fortune and Rose, 2001.

ала («спайка») наблюдаются с интервалом 50, 100 или 200 мс. Эти интервалы можно считать временными стимулами. Например, некоторые животные общаются между собой посредством «щелчков» – коротких серий звуков, интервалы между которыми несут определенную информацию. Во всех трех случаях первый «спайк» вызывает одно и то же изменение потенциала (допустим, 1 мВ). За счет кратковременной синаптической пластичности сила синапса в момент прохождения второго «спайка» будет изменяться. Если второй «спайк» проходит через 50 мс, изменение напряжения может достигать 1,5 мВ, а если он проходит через 100 и 200 мс, напряжение составляет 1,25 и 1,1 мВ соответственно. Допустим, наша сеть действует таким образом, что постсинаптический нейрон возбуждается только в том случае, если получает сигнал не слабее 1,5 мВ, и в таком случае мы имеем своеобразный таймер: нейрон, возбуждающийся при получении двух сигналов с интервалом 50 мс.

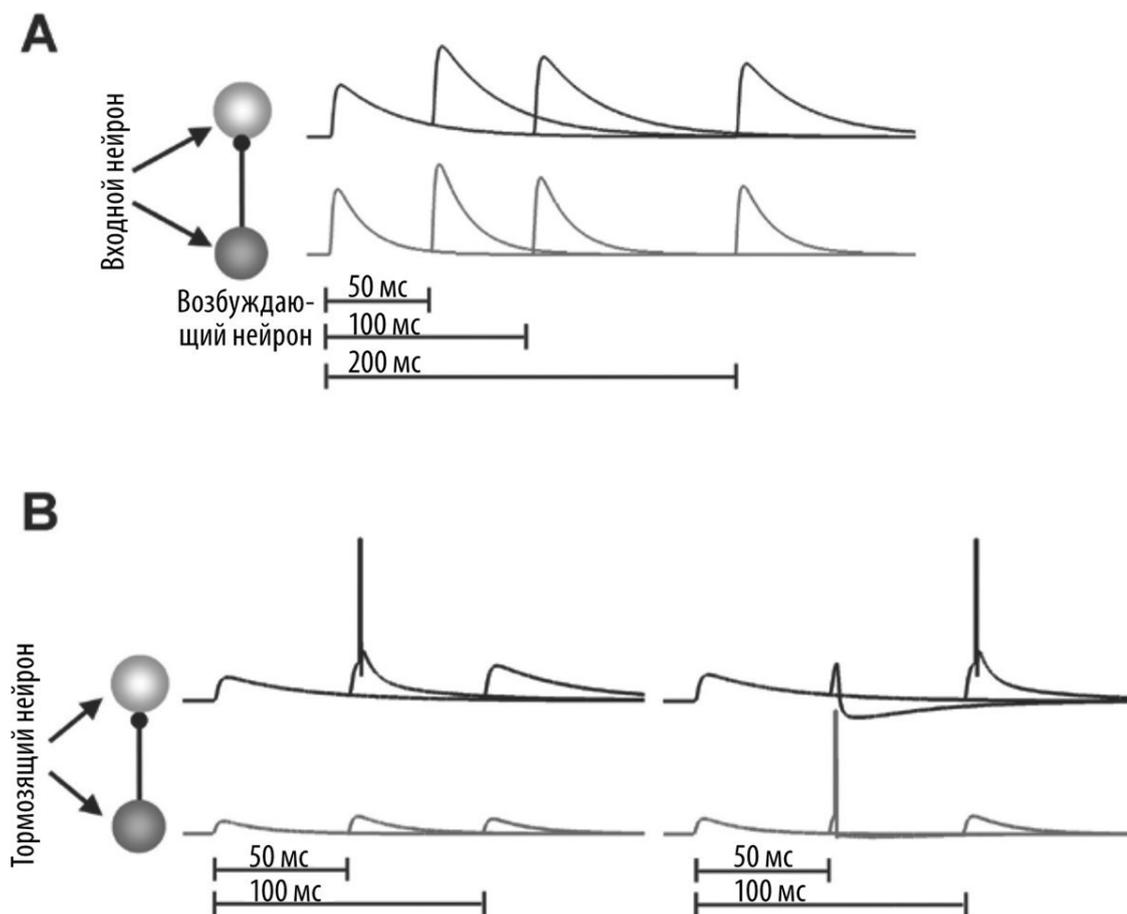


Рис. 6.3. Селекция интервалов, основанная на кратковременной синаптической пластичности

А. В этой простой нейронной сети входной нейрон контактирует с возбуждающим (вверху) и тормозящим (внизу) нейроном. Графики показывают изменения потенциала при трех интервалах времени между пиковыми потенциалами («спайками») входного нейрона – 50, 100 и 200 мс. Синапсы между пресинаптическим и двумя постсинаптическими нейронами испытывают кратковременную фасилитацию: например, амплитуда второго пикового потенциала, возникающего через 50 мс, больше амплитуды первого пикового потенциала.

В. В зависимости от силы синапсов между пресинаптическим и постсинаптическими нейронами возбуждающий постсинаптический нейрон может избирательным образом реагировать на интервал 50 (слева) или 100 (справа) мс. Таким образом, этот возбуждающий нейрон в самой простой сети в некотором смысле может отсчитывать время.

Компьютерные модели нейронных сетей показывают, что простые сети возбуждающих и тормозящих нейронов, демонстрирующих кратковременную синаптическую пластичность, могут избирательным образом реагировать на разные интервалы времени: например, отвечать на интервал длительностью 100 мс, но не 50 или 200 мс¹⁴⁰. Такие настроенные на определенный интервал нейроны в принципе могут служить для определения времени начала озвончения фоном, интервалов между знаками в азбуке Морзе или между музыкальными нотами.

Исследователи обнаружили такие нейроны, избирательным образом реагирующие на разные интервалы времени, в мозге многих животных – от кур и крыс до электрических рыб. Мы пока не знаем точно, как возникает этот избирательный ответ, но некоторые исследования показывают, что как минимум отчасти это связано с кратковременной синаптической пластичностью¹⁴¹.

СЕТИ, ЗАВИСЯЩИЕ ОТ СОСТОЯНИЯ

Понятно, что представленная выше упрощенная схема, состоящая из двух нейронов, чрезвычайно сильно отличается от реальной ситуации в мозге. В кубическом миллиметре ткани коры головного мозга могут содержаться сотни тысяч нейронов и сотни миллионов синапсов¹⁴². Существуют гораздо более общие модели, объясняющие, каким образом сети нейронов коры мозга обрабатывают сложные пространственные и временные образы. В частности, наша лаборатория, а позднее австрийский математик Вольфганг Маасс и его коллеги предложили так называемую *модель сети, зависящей от состояния*¹⁴³. Чтобы понять суть модели, нужно понять концепцию *состояния* кортикальной сети.

В физике под состоянием системы понимают набор параметров, дающих существенную информацию о текущей «конфигурации» системы. Представьте себе несколько шаров на бильярдном столе. Состояние такой системы можно описать положением и импульсом (произведением массы на скорость) каждого шара. В принципе, знание состояния шара в какой-то момент времени позволяет предсказать не только, что произойдет в следующий момент, но и что происходило недавно: зная состояние системы в момент времени t , в соответствии с законами физики можно определить ее состояние в моменты времени $t-1$ и $t+1$. Каков эквивалентный набор параметров, который мог бы позволить нам определять состояние группы нейронов головного мозга?

Обычно состояние сети нейронов в конкретный момент времени определяется тем, какие нейроны находятся в возбужденном состоянии. Я буду называть это *активным состоянием*, поскольку по нему можно определить, какие именно нейроны активно передают информацию своим партнерам. Однако это далеко не полное описание состояния сети, поскольку только на основании активного состояния нельзя предсказать, как будет вести себя сеть в следующий момент. На поведение сети в будущем влияют многие другие свойства нейронов. Одно такое свойство – кратковременная синаптическая пластичность. Понятно, что состояние группы нейронов в следующий момент зависит не только от того, какие нейроны возбуждены в настоящий момент, но и от эффективной силы каждого синапса в каждый момент времени, а это, в свою очередь, зависит от того, что эти синапсы делали в прошлом. Кратковременная синаптическая пластичность – лишь одно из многих свойств нейронов, способных изменяться в диа-

¹⁴⁰ Buonomano, 2000.

¹⁴¹ Carlson, 2009; Rose et al., 2011; Kostarakos and Hedwig, 2012. Примеры интервал-селективных (точнее, интервал-чувствительных) нейронов у млекопитающих описаны в работах Kilgard and Merzenich, 2002; Bray et al., 2008; Sadagopan and Wang, 2009; Zhou et al., 2010.

¹⁴² Beaulieu et al., 1992.

¹⁴³ Buonomano and Merzenich, 1995; Maass et al., 2002; Buonomano and Maass, 2009.

пазоне времени порядка сотен миллисекунд. Такие свойства описывают *скрытое состояние* сети: «скрытое» по той причине, что электроды нейробиологов не могут их проанализировать.

Активное состояние сети в момент времени t определяется входным сигналом и состоянием (активным и скрытым) в момент времени $t-1$. Можно еще раз воспользоваться аналогией с кругами на воде. Представьте себе, что на поверхность пруда падают две капли дождя: первая в момент времени $t = 0$, вторая – в момент времени $t = 100$ мс. Состояние поверхности пруда в момент времени $t = 101$ мс будет зависеть от взаимодействия между вторым сигналом (второй каплей) и текущим состоянием (волнами, созданными на поверхности пруда первой каплей). Важно, что характер волн от падения второй капли будет разным, если она упадет через 100 и через 200 мс после первой. Вывод таков, что, глядя на моментальный снимок поверхности пруда в момент времени $t = 400$ мс, мы сможем определить не только, сколько капель упало, но и оценить интервал времени между их падением (если их было две): недавнее прошлое поверхности пруда отражается в его настоящем. Аналогичным образом ответ сети нейронов определяется текущим входным сигналом и состоянием системы в недавнем прошлом, которое каким-то образом закодировано в настоящем. Таким образом, «ответ» поверхности пруда и сети нейронов *зависит от состояния*. Действительно, мониторинг активности зрительной и слуховой коры показывает, что ответ сети нейронов на стимул сильно зависит от предыдущих стимулов и от времени, которое прошло после их действия¹⁴⁴. Компьютерное моделирование показывает, что зависящие от состояния сети нейронов могут различать не только интервалы времени, но и сложные пространственно-временные образы, такие как разговорная речь¹⁴⁵.

ПОПУЛЯЦИОННЫЕ ЧАСЫ

Говорим ли мы о кругах на воде или об изменении состояния сети нейронов как о механизме определения времени, мы пока не ответили на главный вопрос: как работает этот механизм? Как перевести круги на воде или состояние сети нейронов в единицы времени? Экспериментальные и теоретические исследования позволяют предположить, что один из способов кодирования времени заключается в том, что мозг определяет, какие нейроны активны в каждый конкретный момент времени.

Мы уже рассмотрели простой вариант этой концепции, когда обсуждали активность нейронов в специфическом отделе мозга (HVC) у певчих птиц. Время, прошедшее от начала песни, можно определить по тому, какой конкретно нейрон возбужден в данный момент – подобно тому, как по номеру падающей в данный момент костяшки домино можно узнать, когда упала первая костяшка из стопки. Однако это очень примитивный линейный код. В более общем виде идея заключается в том, что в каждый момент времени активной является большая группа (субпопуляция) нейронов. Я буду называть эту модель моделью *популяционных часов*.

Впервые эту важную идею выдвинул нейробиолог Майкл Маук, тогда работавший в Университете Техаса в Хьюстоне. В 1990-х гг. Маук предположил, что какие-то формы отсчета времени основаны на активности динамически изменяющихся популяций нейронов мозжечка – анатомически различимой части мозга, участвующей в координации движений¹⁴⁶. Например, давайте предположим, что в момент $t = 0$ некий звуковой стимул вызывает возбуждение нейронов мозжечка. Тогда через 100 мс может активироваться субпопуляция нейронов, состоящая из нескольких тысяч клеток, а еще через 100 мс активируется другая субпопуляция. Даже если какие-то нейроны активны в оба момента времени, и ни один нейрон напрямую не сообщает

¹⁴⁴ Kilgard and Merzenich, 2002; Rennaker et al., 2007; Nikolić et al., 2009; Sadagopan and Wang, 2009; Zhou et al., 2010; Klampfl et al., 2012.

¹⁴⁵ Haeusler and Maass, 2007; Buonomano and Maass, 2009; Lee and Buonomano, 2012.

¹⁴⁶ Buonomano and Mauk, 1994; Mauk and Donegan, 1997; Medina et al., 2000.

время, такие популяционные часы все равно позволяют понять, сколько времени прошло от момента $t = 0$: 100 или 200 мс.

В качестве аналогии представьте себе многоэтажный дом со светящимися окнами. Вы смотрите на окна дома и видите, где горит свет, а где нет. Теперь представьте себе, что люди в этом доме живут по странному расписанию. В одном окне свет зажигается на закате, в другом – через час после заката, в третьем свет зажигается на закате, потом выключается через час, а потом вновь зажигается через три часа. Если в доме 100 окон, с помощью двоичной цифровой системы можно записать состояние окон дома в каждый момент времени: 1 0 1 ... на закате, 0 1 1 ... через час после заката, и т. д. (в данном случае каждая цифра означает, включен свет (1) или выключен (0)).

Распределение включенных и выключенных окон описывает *состояние* дома в каждый момент времени (эквивалент активного состояния сети нейронов). Это состояние можно изобразить в виде точек на графике, на котором каждая ось соответствует одному окну. Проблема заключается в том, что нам в таком случае понадобится построить график с 100 осями. На рис. 6.4 показано, как бы мы описали состояние здания в разные моменты времени, если бы у нас было всего три измерения, соответствующих осям x , y и z . Хотя мы не можем изобразить такой график в 100-мерном пространстве, принцип был бы точно таким же. Соединяя точки, соответствующие каждому моменту времени, можно воссоздать *траекторию* здания – изменение состояния окон во времени. И хотя здание совсем не предназначено для того, чтобы служить в качестве часов, благодаря этой внутренней динамике (изменению рисунка освещенности окон) с его помощью можно определять время.

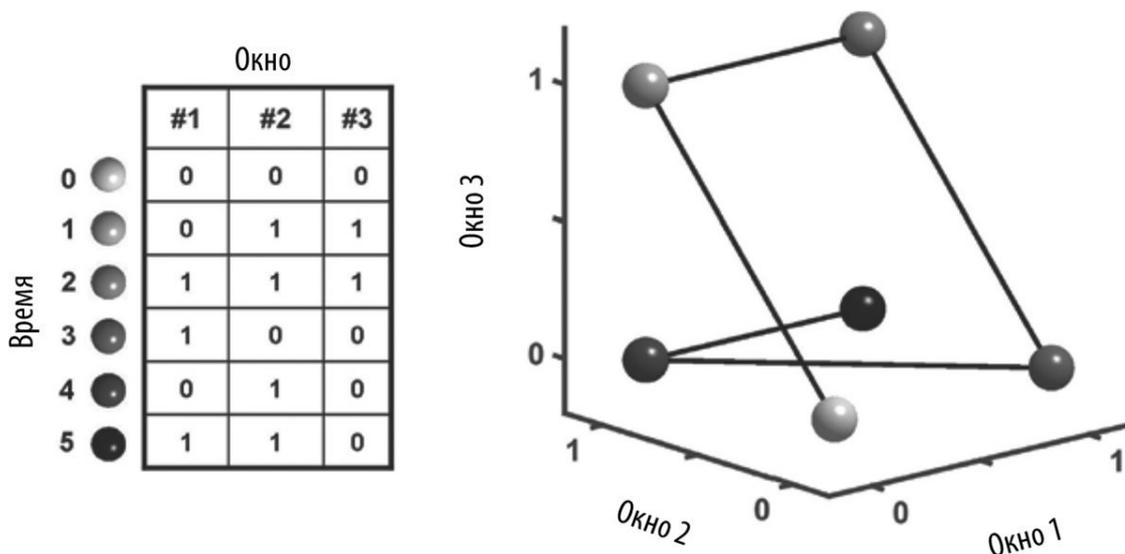


Рис. 6.4. Кодирование времени с помощью изменения освещенности окон здания. Состояние трех окон здания в каждый момент времени (таблица слева) можно представить в виде траектории в трехмерном пространстве (справа).

ЧАСЫ, РЕАГИРУЮЩИЕ НА СОБЫТИЯ

Теперь мы можем представить себе, каким образом изменение картины активации нейронов теоретически может служить в качестве часов. Однако важнейший вывод, который следует из теории Майкла Маука, заключается в том, что сеть из большого числа нейронов представляет собой не *одни* часы, а множество. Возможно, нам не сразу понятны преимущества

использования одной и той же сети в качестве нескольких разных часов, однако такая стратегия создает основу для более мощного вычислительного аппарата.

Допустим, у вас на кухне есть таймер, который можно запрограммировать на определенное время, необходимое для приготовления яйца всмятку, варки макарон или выпечки пирога. Другая стратегия – купить три таймера, по одному для каждой задачи, и у каждого свой звонок. Да, эти три таймера будут занимать на кухонном столе много места, но у этой системы, специфической для каждого действия, есть важное преимущество: когда вы входите в кухню и слышите звонок, вы сразу знаете, нужно ли что-то снять с плиты или выключить духовку. Другими словами, часы, реагирующие на специфические события, одновременно закладывают в память информацию о текущих событиях.

Чтобы лучше понять преимущество наличия множества часов в одной сети нейронов, давайте представим себе новогоднюю елку с гирляндой из тысячи светодиодных ламп. Допустим, при каждом включении гирлянды лампочки начинают светиться по-другому, чем раньше. Вариантов может быть множество: лампочки могут поочередно мигать или исполнять сложный танец, как окна в гипотетическом многоэтажном доме из нашего предыдущего примера. Преимущество первого режима заключается в том, что его легко расшифровать: первая лампочка включается в момент времени $t = 1$, вторая – в момент времени $t = 2$ и т. д. Недостаток таков, что такой режим всего один, так что и таймер всего один. Напротив, сложный режим трудно расшифровать, зато один и тот же набор лампочек можно использовать для создания огромного множества таймеров.

Допустим, наша гирлянда имеет два переключателя: один у Элис, другой у Боба. Представим себе, что переключатель Элис активирует следующий режим включения лампочек с интервалом в 1 с (номера соответствуют положению каждой лампочки в цепи):

$$\begin{aligned} t &= 1\ 5\ 10\ 15\ 20 \\ t &= 2\ 6\ 12\ 18\ 24 \\ t &= 3\ 7\ 14\ 21\ 28 \\ &\dots \end{aligned}$$

А переключатель Боба запускает другую последовательность (заметьте, что в этом случае алгоритмы включения лампочек в разные моменты времени разные):

$$\begin{aligned} t &= 1\ 1\ 2\ 3\ 4 \\ t &= 2\ 1\ 4\ 6\ 8 \\ t &= 3\ 1\ 6\ 9\ 12 \\ &\dots \end{aligned}$$

В таком случае, если вы смотрите на елку и видите, что включены лампочки под номером 8, 16, 24, 32 и т. д., вы знаете не только, что прошло четыре секунды после включения гирлянды, но и что ее включила Элис. Таким образом, наши новогодние лампочки описывают *и* время, *и* пространство, поскольку определяют, сколько времени прошло от момента включения, и какой переключатель был активирован. Зачем мозгу часы, действующие по такому принципу? По той причине, что в диапазоне времени от нескольких миллисекунд до нескольких секунд ему нужно не только определять время, но и выполнять определенные действия в определенные моменты времени.

Один известный пример хронометрированного движения у животных представляет собой классический условный рефлекс: если через 250 мс после звукового сигнала на сетчатку глаза направлять струю воздуха, постепенно человек и другие животные обучаются моргать в ответ на звуковой сигнал. Однако они мигают не в тот момент, когда слышат звук, а тогда, когда предчувствуют появление воздушной струи. Другими словами, животные не просто учатся моргать, они учатся, *когда именно* моргать. Это важный навык, поскольку в ситуации, когда

опасное воздействие может повредить сетчатку, держать глаза закрытыми слишком долго – тоже не самый лучший выход¹⁴⁷.

А могут ли животные научиться моргать в разные моменты времени в ответ на разные звуки? Именно это продемонстрировали эксперименты Майкла Маука. Сотрудники его лаборатории показали, что кролики могут научиться моргать примерно через 150 мс после низкочастотного звукового сигнала и через 750 мс после высокочастотного сигнала. Кроме того, повреждение мозжечка приводило к исчезновению этой способности, так что, вероятно, эти нейронные часы располагаются где-то в мозжечке.

Вот еще один пример, раскрывающий преимущество множества часов. Представьте себе пианиста, умеющего играть на пианино две песни. В первой песне через секунду после начала должна звучать нота до, а в другой – нота ми. Обычные часы подскажут вам, когда пройдет секунда, но они не скажут, какую клавишу нужно нажимать. Однако использование в качестве таймера динамического пространственно-временного режима (как различные режимы переключения гирлянды в примере с Элис и Бобом) поможет решить не только проблему определения времени, но и подскажет, что в какой момент нужно делать. Мозг может использовать эту стратегию, связывая популяцию нейронов, активных на протяжении секунды в первой песне, с двигательными нейронами, отвечающими за нажатие ноты до, а популяцию нейронов, активных на протяжении секунды во второй песне, с двигательными нейронами, ответственными за нажатие ноты ми.

ДИНАМИКА МОЗГА

Ученые проанализировали множество примеров простых и сложных картин активности нейронов, которые, возможно, отвечают за определение времени. Нейробиолог Джо Пейтон из Центра изучения неизвестного (фонд Шампалимо) в Лиссабоне натренировал крыс тыкаться носом в одну из двух «дверей» в зависимости от длительности временного интервала между звуками. Крысы слышали два звука, разделенные интервалом времени от 0,6 до 2,4 с. Если они тыкались носом в левую дверь после интервала короче 1,5 с и в правую дверь после интервала длиннее 1,5 с, они получали вознаграждение. Крысы довольно хорошо справлялись с заданием. Например, временные интервалы длительностью 1 и 2 с они распознавали с вероятностью около 90%.

Пока крысы занимались этим важным делом, исследователи анализировали состояние нейронов полосатого тела их мозга – отдела головного мозга, задействованного в выполнении движений и в некоторых формах обучения. Многие нейроны этого отдела мозга возбуждались во время упражнения. Например, в эксперименте с интервалом времени длительностью 2,4 с некоторые нейроны возбуждались рано, другие позже, так что возникала своеобразная цепочка возбуждения $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow E$ (эта схема сильно упрощает реальную ситуацию)¹⁴⁸. В экспериментах с интервалом времени вблизи пограничного значения 1,5 с крысы, как и ожидалось, совершали больше ошибок. Интересно, что по динамике поведения нейронов эти ошибки можно было предсказать. Например, когда цепочка активности развивалась «слишком быстро», крысы с большей вероятностью решали, что интервал был длинным, и наоборот.

В целом данные эксперименты показывают, что нейроны этой области мозга задействованы в определении времени, хотя, как чаще всего и бывает в нейробиологии, одно отдельно взятое исследование не может доказать, что какие-то конкретные нейроны ответственны за определение длительности интервала между звуками.

¹⁴⁷ Perrett et al., 1993; Raymond et al., 1996; Ohyama et al., 2003.

¹⁴⁸ Mello et al., 2015.

Аналогичный цепной характер активности нейронов наблюдается и в других отделах мозга. Например, нейроны гипоталамуса крысы возбуждаются в специфические моменты времени в процессе выполнения задачи, такой как бег в колесе или выжидание необходимого времени до выполнения механического действия с целью получения вознаграждения¹⁴⁹. Интересно, что в разных исследованиях были обнаружены разные цепи активации нейронов в зависимости от конкретных условий. Например, одни и те же нейроны могут возбуждаться в разное время в зависимости от обонятельного стимула, с которого начиналось выполнение задачи. Это означает, что данные нейроны не только отсчитывают абсолютное время, но, как и в примере с гирляндой Элис и Боба, отслеживают время и «запоминают» стимул, вызвавший их активацию.

При выполнении животными различных временных задач возникают и гораздо более сложные картины активации нейронов. При работе сложных популяционных часов разные нейроны могут возбуждаться в разные моменты и на разное время, а иногда могут возбуждаться повторно и еще раз через какие-то промежутки времени¹⁵⁰. Такие пространственно-временные картины активации нейронов воспроизводятся в повторных экспериментах, но на первый взгляд могут показаться случайными. В некоторых случаях кажется странным отсутствие понятного ритма или причины подобного поведения. Но в этом-то, возможно, и заключается все дело. Говоря о том, что ритм возбуждения нейронов «случайный», мы подразумеваем, что все нейроны могут возбуждаться и отключаться в тот или иной момент времени практически с равной вероятностью.

Но из теории информации известно, что кодовые системы, в которых все символы или элементы могут использоваться с одинаковой вероятностью, предлагают больше возможностей для хранения или передачи информации. Например, английский язык – не очень эффективный код, поскольку разные буквы используются с очень разной частотой. Печатающая текст на английском языке, вы, вполне вероятно, используете клавишу «е» с частотой около 12,5%, а клавишу «q» не чаще 0,1%. Сложные и случайные на вид пространственно-временные картины возбуждения нейронов могут показаться «некрасивыми», но мозгу они, возможно, предлагают наиболее эффективный способ создания большого числа популяционных часов. Более того, возможно, что сложные режимы активации нейронов в одних областях мозга используются для запуска более простых цепных процессов в других областях.

Вполне вероятно, что даже в диапазоне от сотен миллисекунд до нескольких секунд мозг использует разные механизмы определения времени. У животных, решавших временные задачи, были выявлены и другие формы активности нейронов. Возможно, чаще всего встречается механизм активации нейронов, называемый *повышением частоты разрядов*: как в нижней части песочных часов постепенно увеличивается количество песка, так и количество разрядов («спайков») некоторых нейронов линейно увеличивается со временем. Такая картина обычно наблюдается в тех случаях, когда животных тренируют производить какое-то действие после определенного интервала времени. Но пока мы не знаем, сами ли эти нейроны отсчитывают время, или они считывают показания с других сетей нейронов, чтобы в нужный момент запустить ожидаемый ответ¹⁵¹.

¹⁴⁹ Pastalkova et al., 2008; MacDonald et al., 2011; Kraus et al., 2013; MacDonald et al., 2013; Modi et al., 2014.

¹⁵⁰ Lebedev et al., 2008; Jin et al., 2009; Crowe et al., 2010; Kim et al., 2013; Stokes et al., 2013; Crowe et al., 2014; Carnevale et al., 2015.

¹⁵¹ Многие исследователи сообщали о почти линейном повышении частоты разрядов во времени при решении двигательных задач, в которых животные принимают решение после воздействия стимула на протяжении какого-то фиксированного времени (Quintana and Fuster, 1992; Leon and Shadlen, 2003; Mita et al., 2009; Jazayeri and Shadlen, 2015). Однако Майкл Шедлен полагает, что этот рост активности, скорее всего, следует рассматривать как подготовку к движению, нежели как счетчик времени (хотя эти две функции часто коррелируют между собой). Например, начало теста может задаваться тремя командами: НА СТАРТ – ВНИМАНИЕ – МАРШ. При команде ВНИМАНИЕ участники уже предвидят момент начала движения, и каждый следующий момент повышает вероятность услышать команду МАРШ. Возбуждающиеся нейроны могут кодировать ожидание, причем данная картина активности отличается от регистрации реального времени, поскольку, если животные при-

ХАОС

До сих пор мы с вами принимали как должное одно важнейшее свойство любых часов – воспроизводимость показаний. Если пространственно-временная активность популяции нейронов используется для отсчета времени, она должна воспроизводиться из раза в раз в ответ на одну и ту же ситуацию или один и тот же стимул. В описанных выше экспериментальных исследованиях это условие соблюдалось: каждый раз, когда певчая птица исполняет свою песню, обнаруживается одна и та же нейронная траектория (хотя в каждом исследовании варьируется множество параметров). Однако загадка все еще остается загадкой: как именно мозгу удается вновь и вновь воспроизводить одну и ту же последовательность действий?

Компьютерное моделирование показывает, что схемы активации нейронов в рекуррентных сетях¹⁵² могут постоянно эволюционировать, что теоретически может использоваться для кодирования времени. Проблема заключается в том, что такие эволюционирующие схемы часто не воспроизводятся, а такие сети ведут себя хаотически.

В математике слово «хаос» используется для описания систем, чрезвычайно чувствительных к «шуму» и начальным условиям (состоянию системы в момент начала конкретного эксперимента). Классический пример – погода и так называемый «эффект бабочки», когда самое незначительное событие в какой-то точке пространства и в какой-то момент времени способно вызвать «эффект домино»: например, взмах крыльев бабочки в долине Амазонки в полдень 1 февраля может привести к изменению погоды в Нью-Йорке через неделю.

Хаотические процессы часто наблюдаются в нелинейных физических системах с обратной связью, таких как погода или поведение бильярдных шаров. Сети нейронов обладают обоими этими свойствами. Во-первых, поведение нейронов нелинейно: отклик нейрона не пропорционален полученному им стимулу. Во-вторых, как указывалось выше, кортикальные сети характеризуются высокой степенью *рекуррентности*: это означает, что активность нейрона в момент времени t_1 влияет на поведение других нейронов в момент времени t_2 , что, в свою очередь, влияет на поведение первого нейрона в момент времени t_3 .

Чтобы понять, почему хаотические процессы мешают определять время в нелинейных динамических системах, рассмотрим простое математическое уравнение, называемое *логистическим уравнением* (рис. 6.5). Это уравнение описывает эволюцию параметра x (в пределах от 0 до 1) через определенные временные интервалы. На каждой следующей стадии значение параметра x полностью определяется его значением на предыдущей стадии. Несмотря на простоту задачи, результат выглядит достаточно сложно, и минимальные вариации значения x могут вызвать чрезвычайно сильные изменения этого параметра в дальнейшем.

выкли слышать сигнал МАРШ примерно через 0,15 или 0,18 с, возбуждение нейронов происходит в соответствии с этим ожиданием, а не в соответствии с реальным временем (Janssen and Shadlen, 2005).

¹⁵² То есть в нейронных сетях, где связи между нейронами образуют направленную последовательность. – Прим. ред.

Стадия	Раунд 1	Раунд 2
1	0.9900	0.99001
2	0.0386	0.0386
3	0.1448	0.1446
4	0.4829	0.4825
5	0.9739	0.9738
6	0.0993	0.0995
7	0.3488	0.3494
8	0.8859	0.8866
9	0.3943	0.3922
10	0.9314	0.9296
11	0.2492	0.2551
12	0.7296	0.7410
13	0.7694	0.7484
14	0.6920	0.7343
15	0.8313	0.7609
16	0.5471	0.7095
17	0.9664	0.8038
18	0.1268	0.6150

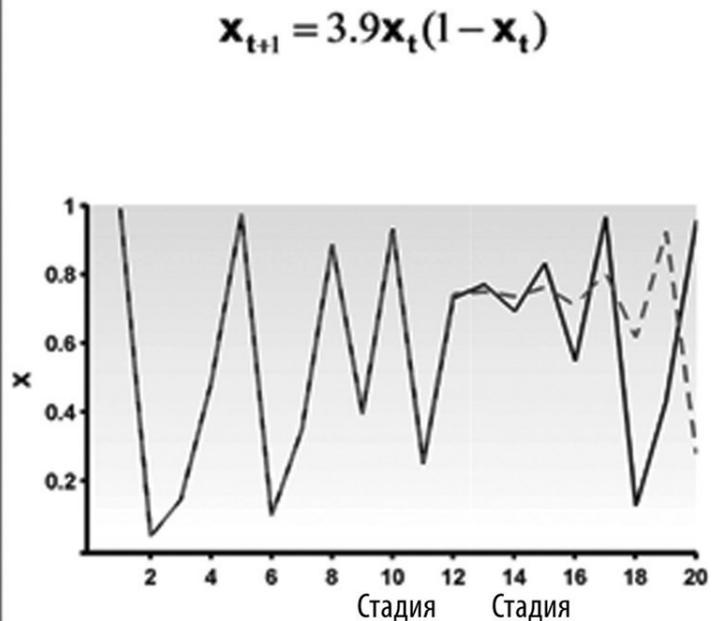


Рис. 6.5. Пример хаотической системы. Значение параметра x на каждой последующей стадии (в момент времени $t+1$) определяется значением x на текущей стадии. Даже если в двух раундах процесс начинается с очень близких значений x (0,99 и 0,99001), со временем значения x начинают расходиться, что видно из таблицы и из графика. Поначалу это расхождение незаметно, но примерно после 18-й стадии значения x в двух раундах не имеют между собой ничего общего

Заметьте, что представленную на рис. 6.5 таблицу можно использовать в качестве своеобразного таймера. Если известно, что исходное значение x равнялось 0,9900, а текущее значение составляет 0,5471, можно определить, что от начала раунда прошло 16 стадий. Таким образом, в принципе, физические системы, подчиняющиеся такому логистическому уравнению, можно использовать в качестве часов.

Однако проблема заключается в том, что эти системы чрезвычайно чувствительны к помехам или самым незначительным погрешностям измерений. Например, если во втором раунде исходное значение x равно не 0,9900, а 0,99001, на 16-й стадии мы вместо 0,5471 получим 0,7095. Состояние хаотической системы (в данном примере значение параметра x) быстро изменяется в результате самых ничтожных пертурбаций, а это означает, что из раза в раз система ведет себя по-разному. Поэтому хаотические системы – довольно скверные часы.

Компьютерное моделирование систем со случайным распределением связей между нейронами показывает, что такие *рекуррентные сети со случайными связями между нейронами* могут создавать самовоспроизводящиеся схемы активности, в которых в каждый следующий момент времени сеть находится в ином состоянии. В принципе, такие пространственно-временные схемы могут использоваться для определения времени. Однако в 1980-х гг. израильский физик, информатик и нейробиолог Хаим Сомполинский и его коллеги доказали, что во многих случаях такие рекуррентные сети со случайной связью нейронов создают хаотические схемы активности¹⁵³. Это поставило нейробиологов в сложную ситуацию. С одной стороны,

¹⁵³ Sompolsky et al., 1988.

кора головного мозга состоит из рекуррентных сетей нейронов, способных создавать воспроизводимые динамические схемы активности – в противном случае мы не могли бы несколько раз сыграть на пианино одну и ту же пьесу или воспроизводить собственную подпись. С другой стороны, теоретические исследования показывают, что кортикальные сети являются хаотическими.

Мы пока еще не знаем, как сети нейронов мозга решают проблему хаоса. Было выдвинуто несколько гипотез, объясняющих способность рекуррентных нейросетей создавать сложные нехаотические образы – такие, которые можно воспроизвести вновь и вновь. Одна модель предполагает, что сети нейронов могут избегать хаоса и воспроизводить специфические траектории возбуждения благодаря обучению синапсов. По крайней мере, в теории, при правильной настройке синапсов в модельной сети нейронов удастся получать сложные и нехаотические схемы возбуждения. Как продемонстрировано на рис. 6.6, такой подход является мощным инструментом для создания сложных изменяющихся во времени схем двигательной активности.

Данная модель иллюстрирует характер активности десяти нейронов из сети, состоящей из 800 связанных между собой нейронов, в серии многочисленных испытаний. Каждое испытание начинается с короткого импульса, приводящего все нейроны модельной сети в исходное состояние. Начиная с этой исходной позиции, система изменяется динамическим образом: сеть автономным образом изменяется вдоль траектории, выстроенной в 800-мерном пространстве. Мы наблюдаем упрощенную версию процесса в трехмерном пространстве. Чтобы оценить потенциал данной модельной сети, мы можем соединить все 800 нейронов всего лишь с двумя выходными нейронами и предположить, что эти двигательные нейроны контролируют движение карандаша на листе бумаги относительно осей координат X и Y.

Возможно, это не очень понятно на интуитивном уровне, но если рекуррентная сеть заставляет два двигательных нейрона создавать сложный (точнее, многомерный) динамический образ, то эти выходные нейроны могут создавать практически любой рисунок (что достигается путем настройки силы синапсов между рекуррентной сетью и выходными нейронами). В данном примере два выходных нейрона «написали» слово *chaos*.

Важно отметить, что рекуррентные связи были соответствующим образом настроены, и поэтому сеть не является хаотической. Можно нарушить активность сети в середине траектории, но она все равно возвращается к тому, что делала раньше. Грубо говоря, эта система обладает памятью. У рекуррентных сетей есть интересное свойство: они способны запоминать свои действия. И даже если сбить систему с исходной траектории, она может «вернуться» и закончить начатую работу.

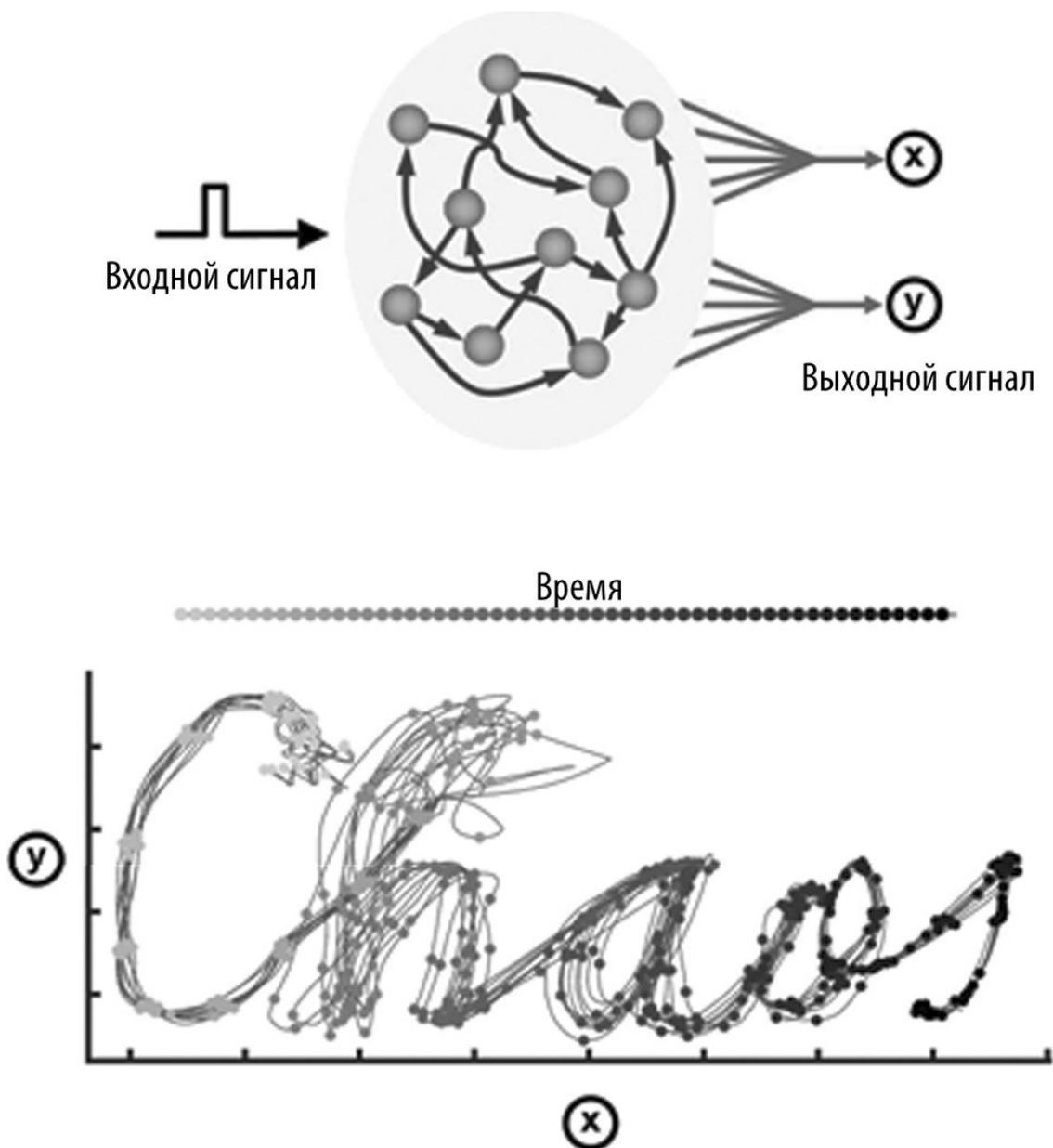


Рис. 6.6. Рекуррентная нейросеть с динамической схемой активности. Данная модельная сеть состоит из взаимосвязанных элементов, имитирующих нейроны (схематично изображено в середине верхней панели). Эти элементы рекуррентной сети получают краткий входной сигнал и передают его двум выходным элементам. Активность этих выходных элементов соответствует положению карандаша по осям X и Y на нижнем графике. Тренировка заключается в настройке весомости связей между элементами сети и выходными элементами в соответствии с правилами обучения. После тренировки в ответ на краткий входной сигнал рекуррентная сеть создает сложную схему активности с такими выходными сигналами, которые заставляют карандаш написать слово «Chaos». Двигательные образы, такие как написанные от руки знаки, являются временными образами, так что данная сеть в каком-то смысле кодирует еще и время. Точки на линиях отмечают время. Эта сеть не является хаотической, поскольку после пертурбаций на подъеме при написании буквы «h» образы воспроизводимо накладываются друг на друга (представлены результаты десяти испытаний). Воспроизводится с модификациями в соответствии со статьей Laje and Buonomano, 2013.

Кроме того, как вы видите, написание слова *chaos* требует хронометрированного контроля движений, так что движение карандаша можно использовать для определения времени.

Жирные точки на рисунке – это отметки времени: зная текущее положение карандаша, можно определить, сколько времени прошло от момента получения входного сигнала. Таким образом, хаотические рекуррентные сети нейронов можно «приручить» путем настройки силы синаптических связей.

Теперь не помешает на минутку остановиться и задать вопрос: *как именно эта нейросеть написала слово «хаос»?* (или, точнее, где хранится информация, создающая двумерный образ, который человеческий мозг распознает как слово «хаос»?) Это серьезный вопрос, для ответа на который нужно отвлечься от традиционных представлений о вычислениях и памяти. Информация, на основе которой формируется слово «хаос», одновременно находится повсюду и нигде. В формировании этого образа участвует каждый синапс и каждый активированный нейрон, но ни один конкретный синапс или нейрон не является строго обязательным для формирования образа. Этот образ – *эмерджентное* свойство системы: *общий результат больше суммы составных частей.*

ВОПРОС, КАКИЕ ИМЕННО НЕЙРОНЫ ИЛИ НЕЙРОСЕТИ МОЗГА ОПРЕДЕЛЯЮТ ВРЕМЯ, МОЖНО СРАВНИТЬ С ВОПРОСОМ, КАКИЕ ИМЕННО ТРАНЗИСТОРЫ ИЗ МИЛЛИАРДА ТРАНЗИСТОРОВ В ПРОЦЕССОРЕ ВАШЕГО КОМПЬЮТЕРА ОТВЕЧАЮТ ЗА ДВОИЧНУЮ ЛОГИКУ. В ЭТОМ ПРОЦЕССЕ УЧАСТВУЮТ ОНИ ВСЕ, И ИМЕННО В ЭТОМ ЗАКЛЮЧАЕТСЯ ИХ ЗАДАЧА.

Описанная выше сеть – довольно простая компьютерная модель с множеством встроенных допущений. И даже если с ее помощью удастся лучше понять какие-то принципы функционирования коры мозга, она слишком проста и негибка, чтобы объяснить удивительную способность мозга обучаться распознавать и создавать такие сложные образы, как речь или музыка. Тем не менее все большее количество экспериментальных данных подтверждает, что многие производимые мозгом вычисления, особенно связанные с отсчетом времени, основаны на способности мозга активизировать в нейросетях сложные динамические траектории, которые могут использоваться для создания пространственно-временных образов, лежащих в основе нашей способности быстро пробегать глазами книгу или играть на фортепьяно¹⁵⁴.

Необходимость отсчитывать время возникает практически во всех решаемых мозгом задачах, причем разные задачи требуют разных способностей: мозгу приходится различать длительность половины и четверти музыкальной ноты, отправлять сообщение с помощью азбуки Морзе, определять время начала озвончения при произнесении согласных звуков «б» или «п» или предугадывать время переключения сигнала светофора. Чтобы решать столь разнообразные задачи, мозг использует набор взаимосвязанных механизмов отсчета времени, распределенных в сетях нейронов. Однако интересно, что часы мозга имеют мало общего с часами, созданными *с помощью* человеческого мозга.

Сила синапсов со временем изменяется, число возбужденных нейронов увеличивается и уменьшается, частота осцилляций нейронов колеблется, и активность сетей нейронов динамически меняется со временем, поскольку одна из задач, для решения которой эволюционировали нейроны, заключается в определении времени. Так что вопрос, какие именно нейроны или нейросети мозга определяют время, можно сравнить с вопросом, какие именно транзи-

¹⁵⁴ Mante et al., 2013; Rigotti et al., 2013; Sussillo and Barak, 2013; Carnevale et al., 2015.

сторы из миллиарда транзисторов в процессоре вашего компьютера отвечают за двоичную логику. В этом процессе участвуют они все, и именно в этом заключается их задача.

ЧАСТЬ II

ФИЗИЧЕСКАЯ И МЕНТАЛЬНАЯ ПРИРОДА ВРЕМЕНИ

7:00

ЗАСЕКАЕМ ВРЕМЯ

Время для часов – что разум для мозга.
ДАВА СОБЕЛ¹⁵⁵

Ядро нейрона и содержащиеся в нем хромосомы так же невидимы для человеческого глаза, как спутники Нептуна. Во временном измерении длительность взмаха крыла колибри столь же неподвластна нашему восприятию, как континентальный дрейф. Человек создал микроскопы и телескопы, чтобы различать объекты за пределами нашего ограниченного пространственного восприятия. Аналогичным образом, чтобы анализировать процессы, происходящие в диапазоне времени, который меньше и больше того, что воспринимает мозг, мы разработали специальные методы и инструменты – если хотите, временные микроскопы и телескопы.

Временные телескопы позволили установить, что человек и человекообразные обезьяны разошлись от общего предка примерно 7 млн лет назад, а также предсказать, что через несколько миллиардов лет наше Солнце превратится в красного гиганта и поглотит Меркурий и Венеру.

Напротив, увеличивающие временные микроскопы (высокоточные часы) позволяют расщеплять секунды на составляющие единицы – миллисекунды, микросекунды, наносекунды, пикосекунды, находящиеся далеко за пределами человеческого восприятия и понимания. Современные атомные часы отсчитывают время с точностью до аттосекунд – так точно, что измерение времени с помощью атомных часов – это один из немногих случаев, когда ученым предоставляется возможность использовать приставку атто (10⁻¹⁸). Возможность оценивать время по шкале в миллиарды лет и делить секунды на аттосекунды появилась в результате развития физики, а сама физика отчасти возникла в результате нашего желания научиться определять время.

Тем семечком, из которого выросла физика, была астрономия, а астрономия появилась по той причине, что люди хотели определить свое место в пространстве и во времени. Кроме прочего, астрономия позволяла следить за сменой сезонов, установить длительность года и даты служения небесным богам. Последующие успехи в определении времени совсем не случайно совпадали с революционными открытиями в физике. Например, важнейшая веха в истории часового дела пришлась как раз на середину одного из важнейших периодов в истории физики: голландский физик Христиан Гюйгенс создал первые в мире высокоточные часы с маятником в 1657 г. – через 15 лет после смерти Галилео Галилея и в годы юности Исаака Ньютона.

Физика и тема времени неразрывно связаны. Дело не только в том, что вопросы природы времени относятся к области физики. Именно понимание законов физики позволило ученым создать удивительно точные часы, которые используются для проверки физических законов.

¹⁵⁵ Дава Собел – современная американская писательница. – *Прим. перев.*

В следующих главах мы поговорим о физике времени и о том, насколько совместимы идеи физики и нейробиологии в вопросах природы времени. Однако начнем мы с исследования физических принципов работы и истории часов.

НЕЙРОНЫ И ИСПЫТАНИЯ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ

Как мозг использует разные механизмы для отсчета проспективного и ретроспективного времени, так и ученые разработали принципиально различающиеся способы определения времени для тех случаев, когда нужно оценить время, которое прошло после какого-то события в прошлом, или которое пройдет от настоящего момента до какого-то момента в будущем.

Для определения проспективного времени мы обычно пользуемся традиционными часами, но для оценки ретроспективного времени нам приходится опираться на показания самых разных «часов». К счастью, в природе существует множество ретроспективных часов, поскольку по действующим во вселенной законам все изменения, происходящие вокруг и внутри нас, подчиняются заранее установленным правилам. Так, круги на воде, которые мы видим сейчас, позволяют узнать, что произошло несколько секунд назад. Патологоанатом может установить время смерти по температуре тела, а по степени сходства генов двух видов организмов можно определить, когда они разошлись от общего предка.

СОВРЕМЕННЫЕ АТОМНЫЕ ЧАСЫ ОТСЧИТЫВАЮТ ВРЕМЯ С ТОЧНОСТЬЮ ДО АТТОСЕКУНД – ТАК ТОЧНО, ЧТО ИЗМЕРЕНИЕ ВРЕМЕНИ С ПОМОЩЬЮ АТОМНЫХ ЧАСОВ – ЭТО ОДИН ИЗ НЕМНОГИХ СЛУЧАЕВ, КОГДА УЧЕНЫМ ПРЕДОСТАВЛЯЕТСЯ ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАТЬ ПРИСТАВКУ АТТО (10⁻¹⁸). ВОЗМОЖНОСТЬ ОЦЕНИВАТЬ ВРЕМЯ ПО ШКАЛЕ В МИЛЛИАРДЫ ЛЕТ И ДЕЛИТЬ СЕКУНДЫ НА АТТОСЕКУНДЫ ПОЯВИЛАСЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗВИТИЯ ФИЗИКИ, А САМА ФИЗИКА ОТЧАСТИ ВОЗНИКЛА В РЕЗУЛЬТАТЕ НАШЕГО ЖЕЛАНИЯ НАУЧИТЬСЯ ОПРЕДЕЛЯТЬ ВРЕМЯ. ТЕМ СЕМЕЧКОМ, ИЗ КОТОРОГО ВЫРОСЛА ФИЗИКА, БЫЛА АСТРОНОМИЯ, А АСТРОНОМИЯ ПОЯВИЛАСЬ ПО ТОЙ ПРИЧИНЕ, ЧТО ЛЮДИ ХОТЕЛИ ОПРЕДЕЛИТЬ СВОЕ МЕСТО В ПРОСТРАНСТВЕ И ВО ВРЕМЕНИ. КРОМЕ ПРОЧЕГО, АСТРОНОМИЯ ПОЗВОЛЯЛА СЛЕДИТЬ ЗА СМЕНОЙ СЕЗОНОВ, УСТАНОВИТЬ ДЛИТЕЛЬНОСТЬ ГОДА И ДАТЫ СЛУЖЕНИЯ НЕБЕСНЫМ БОГАМ.

Одним из наиболее важных способов ретроспективного отсчета времени является радиоизотопный анализ. Как работает этот метод? Откуда атомы «знают», сколько времени прошло с того или иного момента? Чтобы ответить на этот вопрос, давайте поговорим о том, как радиоизотопный анализ и распространение ядерного оружия помогли отвергнуть одну столетнюю догму нейробиологии. На протяжении XX в. нейробиологи были убеждены в том, что, в отличие от большинства других клеток тела, новые нейроны не могут возникать в организме взрослого человека. Однако начатые в 1990-х гг. эксперименты на мышцах и крысах убедительно доказали, что в некоторых отделах мозга новые нейроны все же появляются; этот процесс был назван взрослым нейрогенезом. Но как понять, происходит ли такой процесс у человека, ведь нейроны человека можно изучать только после смерти. Возраст человека на момент смерти обычно известен, но дата рождения конкретного нейрона нигде не записана.

В период 1950–1960-х гг. в результате испытаний атомного оружия, главным образом Соединенными Штатами и Советским Союзом, в атмосфере почти вдвое выросло содержание радиоактивного изотопа ¹⁴C (углерод-14). Этот показатель достиг максимума в 1963 г., когда был подписан договор о частичном запрещении испытаний ядерного оружия, а затем начал сни-

жаться. Подъем концентрации ^{14}C в атмосфере привел к подъему его концентрации во всех живых организмах, поскольку в процессе фотосинтеза углерод попадает в клетки растений, а оттуда в клетки всех остальных живых существ. Так испытания атомной бомбы привели к заметному повышению содержания изотопа ^{14}C в человеческой ДНК.

Атомы углерода, попадающие в ДНК в момент «рождения» клетки (в процессе деления родительской клетки), могут оставаться в этой ДНК на всем протяжении жизни клетки. Таким образом, если у взрослых людей никогда не появляются новые нейроны, в нейронах людей, рожденных до испытаний ядерного оружия, должно быть низкое содержание изотопа ^{14}C . Но если нейроны продолжают делиться, некоторые из них будут содержать больше радиоактивного изотопа из-за повышения его содержания в атмосфере в конце 1950-х гг. Шведские ученые проанализировали образцы ткани мозга умерших людей и обнаружили, что у людей, родившихся до 1955 г., ДНК большинства нейронов содержит небольшое количество радиоактивного изотопа углерода¹⁵⁶. Это означает, что большинство нейронов сформировалось до достижения взрослого возраста. Однако (и это совпадает с результатами экспериментов на животных) в субпопуляции нейронов гиппокампа было обнаружено повышенное содержание ^{14}C , что подтверждает наличие нейрогенеза у взрослых людей. Эта странная связь нейробиологии, испытаний ядерного оружия и использования радиоизотопного анализа в качестве ретроспективных часов позволила оспорить долго существовавшую догму о том, что у взрослых людей новые нейроны не формируются.

А теперь вернемся к нашему вопросу: откуда атомы углерода «знают», сколько времени прошло с того или иного момента? Может ли отдельный атом отслеживать ход времени? Принцип радиоизотопного датирования подтверждает, что существует множество способов определения времени, и, как и наш мозг, для определения ретроспективного и проспективного времени мы используем принципиально разные технологические решения.

Порядковые номера химических элементов определяются количеством протонов в их ядрах. У некоторых элементов есть изотопы – атомы с разным количеством нейтронов. Некоторые из этих изотопов называют радиоактивными, поскольку они неустойчивы и со временем распадаются до устойчивых атомных конфигураций. Впрочем, «неустойчивые» изотопы могут быть весьма устойчивыми. Например, изотоп ^{14}C имеет период полураспада 5730 лет. Это означает, что из 1000 атомов ^{14}C через 5730 лет останется 500. Понятно, что количество оставшихся атомов позволяет определить ретроспективное время и, следовательно, возраст окаменелостей, наскальных рисунков, доисторических артефактов, древних рукописей и даже нейронов. Но откуда взялось число 5730? Откуда атом «знает», что ему пора расщепляться? Конечно же, атом ничего не знает. Обратите внимание, что хотя радиоуглеродный анализ является одним из наиболее надежных способов ретроспективного определения времени, один конкретный атом ^{14}C ничего не может сообщить о своем возрасте.

НА ПРОТЯЖЕНИИ XX В. НЕЙРОБИОЛОГИ БЫЛИ УБЕЖДЕНЫ В ТОМ, ЧТО, В ОТЛИЧИЕ ОТ БОЛЬШИНСТВА ДРУГИХ КЛЕТОК ТЕЛА, НОВЫЕ НЕЙРОНЫ НЕ МОГУТ ВОЗНИКАТЬ В ОРГАНИЗМЕ ВЗРОСЛОГО ЧЕЛОВЕКА. ОДНАКО НАЧАТЫЕ В 1990-Х ГГ. ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА МЫШАХ И КРЫСАХ УБЕДИТЕЛЬНО ДОКАЗАЛИ, ЧТО В НЕКОТОРЫХ ОТДЕЛАХ МОЗГА НОВЫЕ НЕЙРОНЫ ВСЕ ЖЕ ПОЯВЛЯЮТСЯ; ЭТОТ ПРОЦЕСС БЫЛ НАЗВАН ВЗРОСЛЫМ НЕЙРОГЕНЕЗОМ.

¹⁵⁶ Bhardwaj et al., 2006; Spalding et al., 2013. Другие исследования также подтверждают наличие нейрогенеза у взрослых людей (Eriksson et al., 1998).

В основе радиоизотопного анализа лежит один из простейших принципов определения времени – принцип *вероятности*. Представьте себе, что в казино удерживают в заложниках 1000 человек, причем у каждого из них имеется по десять монет. Жестокие, но статистически подкованные владельцы казино сообщают, что единственный способ выбраться на волю заключается в том, чтобы подбросить все десять монеток и получить десять «орлов». Если каждому человеку на эту процедуру в среднем нужно потратить одну минуту, по количеству оставшихся на текущий момент заложников можно установить, сколько времени прошло от начала игры. Понятно, что чем меньше осталось людей, тем больше времени прошло. Более того, поскольку можно рассчитать вероятность выпадения десяти «орлов», можно оценить, сколько времени прошло. При подбрасывании десяти монет вероятность того, что все они выпадут вверх «орлом», составляет $1:2^{10}$ (1:1024). Отсюда можно рассчитать, что половина людей обретет свободу через 710 раундов, что составляет 710 мин или 11 ч и 50 мин¹⁵⁷. Таким образом, примерно через каждые 12 ч число людей в зале будет сокращаться вдвое. Если в зале 250 человек, следовательно, они находятся там уже около суток.

Радиоизотопный анализ основан на аналогичном принципе. Для простоты можно представить себе, что нейтроны из атома ^{14}C постоянно пытаются убежать, прорвав электронное облако вокруг ядра (на самом деле, при распаде атома нейтрон расщепляется на протон, электрон и антинейтрино, а атом углерода превращается в атом азота). Здесь нет никаких часов: каждый атом самостоятельно подбрасывает монетку. Если сегодня мы создадим отдельный атом ^{14}C , с 50% вероятностью за 5730 лет он распадется с образованием атома азота. Если мы вернемся через 5730 лет и обнаружим, что он все еще не распался, какой будет вероятность его распада в последующие 5730 лет? Те же 50%. Как подбрасывание монет – исключительно вероятностный процесс, так и атом не имеет никаких воспоминаний о том, сколько тысячелетий он уже играет в орлянку.

Возможность определять время по радиоактивному распаду основана на статистике поведения популяции: чем больше исходное число радиоактивных атомов, тем точнее оценка времени. Единичный атом не даст информации о протекшем времени, но популяция атомов может служить надежным часовым механизмом. Обратите внимание, что здесь наблюдается определенное сходство с популяционными часами мозга, действие которых основано на анализе субпопуляций нейронов, активных в конкретный момент времени.

КАЛЕНДАРЬ

Наших предков больше интересовало определение не ретроспективного, а проспективного времени. И первые попытки отслеживания времени были связаны с созданием календаря. Предсказание фаз Луны, наступления зимы и миграции потенциальной добычи играло жизненно важную роль. Для определения наиболее благоприятного времени для начала войны, посева и сбора урожая, проведения религиозных церемоний, свадеб и похорон предсказатели, жрецы, мудрецы и астрономы ориентировались на Луну, звезды и природный ритм жизни растений и животных (а также на множество суеверий). Умение определять эти важные даты давало власть, а власть неизбежно влекла за собой злоупотребление властью. Судя по всему, римские жрецы, отвечавшие за календарь, не брезговали возможностью укоротить срок правления того или иного неудобного политика. Как пишет журналист Дэвид Юинг Дункан, «Наиболее политизированные жрецы иногда увеличивали длительность календарного года, чтобы

¹⁵⁷ В данном случае «время полураспада» определяется как $t_{50} = \ln(2) \times 2^{10}$.

дольше удержать у власти угодных им консулов и сенаторов, а иногда укорачивали, чтобы побыстрее убрать их соперников»¹⁵⁸.

Не удивительно, что первые попытки предсказать смену сезонов основывались на поведении двух самых заметных небесных тел. Однако Солнце и Луна существуют в разном ритме. На протяжении тысячелетий хранители времени вынуждены были мириться с неприятным фактом, заключающемся в том, что солнечный год не делится на целое число лунных месяцев. Земля оборачивается вокруг Солнца за 365,25 суток (хотя на протяжении большей части человеческой истории считалось, что это Солнце вращается вокруг Земли), а Луна в среднем оборачивается вокруг Земли за 29,53 суток. Таким образом, солнечный год включает в себя 13,4 лунных месяца.

В V в. до н. э. вавилоняне нашли выход из положения: в их 19-летнем цикле было 7 лет длительностью по 13 месяцев и 12 лет длительностью по 12 месяцев. Египтяне и римляне мудро решили просто игнорировать лунный цикл при расчете продолжительности года и ритма смены сезонов. Но проблема оставалась: солнечный год содержит нецелое число дней. Другими словами, время вращения Земли вокруг Солнца не делится без остатка на время вращения Земли вокруг собственной оси. Если принять, что длительность года составляет 365 дней, через сотню лет летние каникулы будут начинаться на 25 дней раньше.

Чтобы кое-как привести в соответствие счет дней и лет, Юлий Цезарь созвал математиков, астрономов и философов. И они придумали високосный год. Юлианский календарь состоял из 12 месяцев и 365 дней, но каждые четыре года, в високосный год, добавлялся дополнительный день. В честь Юлия Цезаря один месяц года стали называть июлем.

Это была важная веха в истории человечества, но и юлианский календарь не был идеальным. Нужна была дополнительная, еще более тонкая, настройка. За столетия календарь все больше расходился с солнечным годом, поскольку реальная длительность солнечного года составляет не 365,25 дней, а 365,2425 дней. Чтобы исправить ситуацию, в 1582 г. папа римский Григорий XIII объявил, что раз в 100 лет один високосный год будет пропускаться, а раз в 400 лет будет пропускаться пропуск. Сегодня мы живем по григорианскому календарю, но чтобы еще точнее учесть нерегулярность поведения небесных тел и совместить солнечный день с всемирным координированным временем, нам приходится учитывать пропущенные секунды. Начиная с 1972 г., свыше 20 упущенных секунд были незаметно введены в наши часы.

ПЕРВЫЕ ЧАСЫ

Календари сообщают нам, какой сегодня день, но не могут определить время суток. Для определения времени суток уже с IV в. до н. э. люди начали использовать солнечные часы. Первые солнечные часы представляли собой просто воткнутую в землю вертикальную палочку и черточки, указывавшие, куда попадает тень в разное время дня. В большинстве случаев циферблат был разделен на 12 интервалов, но на протяжении большей части истории длительность «часов» не совпадала с нашими часами, поскольку «часов» всегда было 12, хотя летом день длится 15, а зимой – 9 часов. Такие солнечные часы сообщали относительное время, поскольку часы растягивались или удлинялись в зависимости от сезона¹⁵⁹.

В Древнем Риме солнечные часы были повсюду. И с этого периода начался непрерывный переход от свободной трактовки времени к жесткой дисциплине часов. Появились и недовольные. Во II в. до н. э. римский поэт Плавт негодовал:

Пусть проклянут боги человека,

¹⁵⁸ Duncan, 1999.

¹⁵⁹ Matthews, 2000, 53.

*который первым додумался, как различать время!
Пусть проклянут они также того,
кто установил в этом месте солнечные часы
и гнусным образом рассек на части мой день.
Когда я был мальчиком,
только мой желудок служил мне солнечными часами,
намного превосходящими в точности все остальные.
Стоило мне чего-нибудь захотеть,
как он напоминал мне об этом,
разве что только негде было этого достать!
А теперь, даже если всего вдоволь,
нельзя ничего съесть, пока не разрешит Солнце.
И вот, из-за того, что город полон солнечных часов,
большая часть народа изнемогает от жестокого голода* ¹⁶⁰.

Кроме того, существовали другие способы определить время – не стандартные часы, а таймеры. Клепсидра, или водяные часы, отмечали фиксированный отрезок времени путем пропускания воды через небольшое отверстие до заполнения или опустошения сосуда. А примерно в XIII в. появились первые механические часы.

В отличие от водяных часов, механические часы не замерзают зимой. В отличие от солнечных часов, они работают в пасмурные дни и даже ночью. Возникает резонный вопрос: зачем в то время, когда не было ночных перелетов, видеофильмов и сменной работы, людям нужно было точно знать время дня и ночи? Ответ такой: было одно дело, которое некоторые люди должны были делать через строго определенные промежутки времени, в дождь и в солнечную погоду. Это дело – молитва. Жизнь в монастырях была строго регламентирована, и в соответствии с принятым в VII в. указом папы Сабиниана колокол призывал монахов к молитве 7 раз в сутки. Так что часы были «не просто способом определения времени, но синхронизировали действия людей»¹⁶¹. Монастыри и церкви первыми перешли на использование механических часов. При церквях возводили колокольни, и часто в обязанность монахов и священников (если они не просыпали) входило следить за временем и звонить в колокол, чтобы объявлять время горожанам:

*Братец Якоб, братец Якоб!
Ты не спишь? Ты не спишь?
Слышишь колокольчик? Слышишь колокольчик?
День-день-день! День-день-день!* ¹⁶²

МАЯТНИК

По-видимому, Галилей был первым человеком, который заметил, что время полного колебания подвешенного на веревочке груза практически не зависит от амплитуды колебания. Однако только после смерти Галилея это наблюдение нашло применение в часах с маятником. Но еще при жизни ученого свойства маятника использовались для создания одного из первых медицинских инструментов – *пульсилогизума*. Этот инструмент представлял собой груз на

¹⁶⁰ Перевод О. Р. Бородина. – Прим. перев.

¹⁶¹ Mumford, 1934/2010, 4.

¹⁶² Английская и французская версии этой песенки значительно различаются.

веревочке, связанной с горизонтальной планкой. Планка позволяла удлинять и укорачивать веревку. Изменяя длину веревки, врач приводил период колебания маятника в соответствие с пульсом пациента. В результате длина веревки служила вполне надежной мерой частоты сердцебиений¹⁶³.

На основе открытия Галилея Христиан Гюйгенс создал первые точные часы с маятником. Он был лучшим математиком, чем Галилей, и смог в деталях разобраться в динамике поведения маятника. Благодаря математическим способностям Гюйгенса и ряду технических новшеств, созданные им в 1657 г. часы стали гигантским прорывом в часовом деле. До Гюйгенса самые точные часы отклонялись от реального времени как минимум на 15 минут в сутки, тогда как среднесуточный уход часов Гюйгенса не превышал 10 секунд¹⁶⁴.

ШИРОТУ МЕСТОНАХОЖДЕНИЯ ОПРЕДЕЛИТЬ ДОСТАТОЧНО ПРОСТО ПО РАСПОЛОЖЕНИЮ СОЛНЦА В ЕГО ВЫСШЕЙ ТОЧКЕ (МЕСТНЫЙ ПОЛДЕНЬ). НО НИКТО НЕ ЗНАЛ СПОСОБА ТОЧНО ОПРЕДЕЛИТЬ ДОЛГОТУ ПО ПОЛОЖЕНИЮ СОЛНЦА, ЛУНЫ ИЛИ ЗВЕЗД. В ПЕРИОД, КОГДА ПОРТУГАЛИЯ, ИСПАНИЯ, ФРАНЦИЯ, АНГЛИЯ И ИТАЛИЯ СОПЕРНИЧАЛИ В ОСВОЕНИИ БОГАТСТВ НОВОГО СВЕТА, ЭТО БЫЛА ЧРЕЗВЫЧАЙНО СЕРЬЕЗНАЯ ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ПРОБЛЕМА.

10 секунд по отношению к 24 ч составляют примерно 0,01%. Такая точность – невероятное достижение в истории часов: это были первые часы, созданные благодаря человеческому разуму и превосходящие по точности часы человеческого мозга. Как мы уже видели, лучший биологический хронометр – циркадные часы, регулирующие наш цикл сна и бодрствования, – имеют точность порядка 1% (что составляет 15 мин в сутки). Это означает, что период циркадных часов колеблется от 23 ч и 45 мин до 24 ч и 15 мин¹⁶⁵.

Однако часы Гюйгенса не решили одну из важнейших научных и технологических проблем в истории цивилизации – проблему долготы.

В конце XV и начале XVI в. европейские мореплаватели активно бороздили океаны в поисках новых торговых путей, островов и континентов и даже совершили кругосветное путешествие. Порой они терялись на необъятных просторах океана, поскольку не имели возможности определить свое местонахождение по отношению к оси восток–запад (долготу). Широту местонахождения определить достаточно просто по расположению Солнца в его высшей точке (местный полдень). Но никто не знал способа точно определить долготу по положению Солнца, Луны или звезд. В период, когда Португалия, Испания, Франция, Англия и Италия соперничали в освоении богатств Нового Света, это была чрезвычайно серьезная экономическая проблема.

В поисках земли моряки погибали от голода и цинги, капитаны сажали суда на мель, и огромные сокровища погружались в глубины океана. Во время одной такой катастрофы в 1707 г. британский адмирал сэра Клаудсли Шовелл послал свои суда на острова Силли в юго-западной части Британских островов. В этой экспедиции пропали четыре из пяти судов, на которых в общей сложности находилось около 2 тысяч моряков. Отчасти в результате этой трагедии королева Анна в 1714 г. учредила награду достоинством свыше миллиона долларов в современных деньгах за открытие точного метода расчета долготы в море.

Определить долготу – значит определить свое местоположение в пространстве. Возникает вопрос: какое отношение это имеет к часам? Дело в том, что в математике пространство

¹⁶³ Matthews, 2000.

¹⁶⁴ Matthews, 2000.

¹⁶⁵ Стандартное отклонение периода циркадных часов грызунов составляет от 5 до 15 мин (Welsh et al., 1986; Herzog et al., 2004).

(расстояние) – дитя времени и скорости (расстояние – это время, помноженное на скорость). Таким образом, любой движущийся с постоянной скоростью предмет можно использовать для расчета расстояний, нужно лишь знать, как долго он движется.

Многие процессы происходят с постоянной скоростью: движение луча света, вращение Земли. На основании почти постоянной скорости звука наш мозг определяет местоположение источника звука. Как мы уже обсуждали в предыдущих главах, мы понимаем, что говорящий находится слева или справа от нас, поскольку звук его голоса попадает в наше левое и правое ухо с разницей примерно в 0,6 мс. На основании этой задержки мозг может рассчитать, идет ли звук слева, справа или откуда-то посередине.

Земля вращается с постоянной скоростью, совершая оборот на 360° за каждые 24 ч. Таким образом, существует непосредственная связь между градусами долготы и временем. Зная, сколько времени прошло с того или иного момента, можно определить, на сколько градусов повернулась Земля: если вы читаете эту книгу вот уже целый час (1/24 часть суток), Земля за это время повернулась на 15° (360/24). Таким образом, если в полдень вы оказались посреди океана и знаете, что сейчас 16:00 по Гринвичу, следовательно, вы находитесь в точности в «4 часах от Гринвича», т. е. на 60° долготы. Проблема решена. Все, что вам требуется, это лишь точный *морской хронометр*.

Проблемой определения долготы занимались величайшие ученые XVII и XVIII вв., такие как Галилео Галилей, Блез Паскаль, Роберт Гук, Христиан Гюйгенс, Готфрид Лейбниц и Исаак Ньютон. Однако награда, в конце концов, досталась не ученому, а известному изобретателю-самоучке и гениальному часовщику Джону Гаррисону (1693–1776).

Гаррисон и другие понимали, что для решения проблемы долготы нужны часы, которые приводятся в движение металлическими пружинками (пружинами баланса). Маятник в море использовать нельзя, поскольку движение корабля сильно влияет на его колебания. Кроме того, из-за разности температур на суше и в море изменяется длина металлического стержня, на котором закреплен груз.

Вообще говоря, колебания температуры – один из важнейших факторов, которые приходится преодолевать при создании как биологических, так и рукотворных часов. Создание часов, не зависящих от колебаний температуры, – серьезная задача как для эволюции, так и для часовых дел мастеров.

Одним из первых изобретений Гаррисона был решетчатый маятник, в котором груз удерживался системой стержней, изготовленных из разных металлов и присоединенных в противоположных направлениях. В этой конструкции вызванное повышением температуры удлинение стержня в одном направлении уравновешивалось удлинением в другом направлении, так что длина маятника оставалась прежней.

Гаррисон специализировался на изготовлении механических часов. И это позволило ему изобрести *биметаллическую пластину* – соединенные между собой пластины из двух разных металлов с разными коэффициентами теплового расширения. Такие термочувствительные пластины можно использовать для регуляции пружины балансира, так что она сохраняет постоянный период колебаний при изменении температуры.

Благодаря подобным техническим новшествам и невероятному мастерству, Гаррисон сумел создать первый морской хронометр, удовлетворявший всем требованиям, необходимым для установления долготы. Это был прецедент технологического решения, которое с тех пор воспроизводится вновь и вновь: лучший способ для измерения пространства заключается в использовании часов¹⁶⁶.

¹⁶⁶ Landes, 1983, 149–157.

КВАРЦ И ЦЕЗИЙ

На протяжении сотни лет после работы Гаррисона и других мастеров происходило постепенное усовершенствование часовых механизмов. Но на границе XIX и XX вв. в часовом деле наметилась настоящая революция.

Часы стали настолько точными, что их среднесуточный уход не превышал одной секунды, однако возникла проблема синхронизации. Сложно было синхронизировать даже пару часов, расположенных вдали друг от друга: как проверить, что часы в Париже и в Берне показывают одно и то же время? Решение пришло благодаря развитию двух технологий – электричества и радио.

В начале XX в. основной метод синхронизации заключался в *электрокоординации*: электрические сигналы от главных часов отправлялись на периферию с минимальной задержкой.

Координация времени ни в коей мере не была эзотерической академической задачей; это был практический вопрос, от решения которого зависела работа железных дорог, телеграфа и финансового рынка. И, как в большинстве экономически выгодных предприятий, изобретатели патентовали свои изобретения. Поскольку центром часовых технологий была Швейцария, многие патенты оказались зарегистрированными в патентном бюро Берна. Здесь с 1902 по 1909 г. один исполнительный служащий патентного бюро изучил множество разных патентов, в том числе, касающихся электрокоординации часов. В 1905 г. этот человек (звали его Альберт Эйнштейн) опубликовал статью «К электродинамике движущихся тел», которая не только отвергала концепцию абсолютного времени, но и вкратце описывала способ синхронизации удаленных друг от друга часов¹⁶⁷.

О сути работы Эйнштейна мы поговорим в следующей главе. А теперь просто обратим внимание на тот факт, что в начале XX в., после столетий прогресса в области изготовления часов, маятники и механические часы начали устаревать – по крайней мере, в качестве современного измерительного оборудования. В 1920-х гг. появились первые кварцевые часы, а еще через 20 лет были созданы первые атомные часы.

Точность любых часов определяется *генератором колебаний*. Генератором колебаний часов с маятником, понятное дело, является маятник. Генератор колебаний кварцевых часов – не удивляйтесь – маленький кристалл кварца. Под действием напряжения кристалл кварца вибрирует с высокой частотой. Частота вибрации зависит от многих факторов, включая тип и форму кристалла, но обычно кристаллы кварца в цифровых часах вибрируют с частотой 32 768 Гц (2^{15} или 1 000 000 000 000 000 в двоичном исчислении). Эти колебания регистрируются цифровой схемой, которая отсчитывает каждую проходящую секунду.

Сегодня даже дешевые кварцевые часы могут превосходить по качеству механические. Точность современных часов была немыслима во времена Гюйгенса и Гаррисона. Часы Гюйгенса могли терять до 10 секунд в сутки, а атомные часы, возможно, на сегодняшний день выбились бы из ритма на 10 секунд, если бы начали работать в момент образования Земли 4,5 млрд лет назад¹⁶⁸.

Принцип работы атомных часов объяснить чуть сложнее. Такие атомы, как цезий, характеризуются *резонансной частотой* – частотой электромагнитного излучения, которая заставляет их «колебаться». Под «колебанием» в данном случае мы понимаем переход «вращающегося» вокруг ядра электрона на более высокий энергетический уровень. Резонансная частота для изотопа цезия ^{133}Cs составляет 9192631770 Гц. В определенном смысле именно эта частота

¹⁶⁷ Galison, 2003.

¹⁶⁸ Например, атомные часы NIST-F2 могут терять секунду примерно за 300 млн. лет, но более новые атомные часы намного точнее (Hinkley et al., 2013; Bloom et al., 2014).

и служит генератором колебаний атомных часов, а атомы цезия играют роль калибровочного устройства, проверяющего правильность частоты.

В 1967 г. международный консорциум¹⁶⁹ ввел определение секунды: «Длительность 9192631770 периодов излучения, соответствующих переходу между двумя сверхтонкими уровнями основного состояния атома цезия 133»¹⁷⁰. Основная единица измерения времени потеряла связь с наблюдаемой динамикой поведения планет и попала в неподдающуюся наблюдению сферу поведения химических элементов.

Как механические часы произвели революцию в морской навигации в XVIII и XIX вв., так атомные часы революционизировали навигацию в современном мире информатики. Система GPS в смартфонах или боеголовках ракет работает путем определения расстояний как минимум между четырьмя спутниками и приемным устройством на Земле. Сигнал от спутника, находящегося на расстоянии 20 000 км, доходит до нас примерно за 66 мс. Если мы удаляемся от спутника на 10 метров, сигнал будет идти дольше на 33 наносекунды (0,000000033 с). Спутниковый приемник улавливает невероятно малые интервалы между временем передачи и временем получения сигнала. Для работы такой системы требуется не только наличие множества космических спутников, но и наличие на каждом из них атомных часов (эта замечательная общедоступная услуга оплачивается американскими налогоплательщиками и американскими военными). Определяя различие во времени прибытия сигнала от нескольких спутников, устройство с GPS вычисляет свое местоположение по широте, долготе и высоте¹⁷¹. Современные атомные часы и спутниковые системы помогли бы сэру Клаудсли Шовеллу не только найти свои суда, но и определить точку на корабле, в которой находился он сам.

ЦЕНА ВРЕМЕНИ

Наши удивительно точные часы служат не только для того, чтобы отслеживать неуловимое течение секунд или часов, но и чтобы определять, как мы распоряжаемся временем. С появлением точных часов появилась почасовая зарплата. В конце XIX в. человек по имени Уиллард Банди понял, насколько важно работодателям знать время прибытия и ухода своих рабочих, и предложил систему регистрации входа и выхода работников *по карточкам*. Основанная Банди компания International Time Recording Company в 1911 г. слилась с Computing Tabulating Recording Company и позднее превратилась в корпорацию International Business Machines (IBM)¹⁷².

Когда Бенджамин Франклин написал «время – деньги», он имел в виду суточный заработок: день без работы сказывался на месячной зарплате. Сегодня фраза «время – деньги» стала еще более актуальной. Трейдеры на фондовых рынках могут использовать преимущества в несколько миллисекунд для получения колоссальной прибыли. И даже просмотр телевизионной программы – временно-финансовая операция: люди тратят свое время на то, чего при других условиях никогда бы не делали (смотрят рекламу), в обмен на «бесплатное» развлечение (оплаченное последующими покупками). При прослушивании музыки и просмотре видео на веб-сайтах можно «выкупить свое время», заплатив за то, чтобы отказаться от рекламы.

¹⁶⁹ 13-я Генеральная конференция по мерам и весам. – Прим. ред.

¹⁷⁰ <http://www.bipm.org/en/publications/si-brochure/second.html> (2/10/2015).

¹⁷¹ Вы можете спросить: если приемное устройство GPS должно учитывать отставание в прибытии сигнала в 30 нс, не нужно ли ему сверяться с атомными часами, чтобы сравнивать задержку сигналов от спутников? В принципе, это нужно, однако GPS достаточно обычных кварцевых часов, которые система постоянно калибрует с помощью точных сигналов от нескольких спутников.

¹⁷² Levine, 1996, 68.

СТОЛЕТИЯ НАЗАД ЧАСЫ РЕДКО СОГЛАСОВЫВАЛИСЬ ДРУГ С ДРУГОМ. НО МЫ СОВЕРШИЛИ ПОЛНЫЙ КРУГ, И ТЕПЕРЬ ПРОБЛЕМА ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ДРУГОМ: НАШИ ЧАСЫ СЛИШКОМ ТОЧНЫ. ИЗ ОБЩЕЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ ЭЙНШТЕЙНА СЛЕДУЕТ, ЧТО ВРЕМЯ, ОПРЕДЕЛЯЕМОЕ ЛЮБЫМИ ЧАСАМИ, ПОДВЕРЖЕНО ВЛИЯНИЮ СИЛ ТЯГОТЕНИЯ. ПОЭТОМУ ОДНИ И ТЕ ЖЕ АТОМНЫЕ ЧАСЫ БУДУТ ТИКАТЬ БЫСТРЕЕ НА КОСМИЧЕСКОМ СПУТНИКЕ, ЧЕМ НА ЗЕМЛЕ (СИСТЕМА GPS ДОЛЖНА УЧИТЫВАТЬ ЭТОТ ЭФФЕКТ). ВООБЩЕ ГОВОРЯ, ПОКАЗАНИЯ ДВУХ САМЫХ СОВРЕМЕННЫХ ОПТИЧЕСКИХ АТОМНЫХ ЧАСОВ БУДУТ РАСХОДИТЬСЯ, ЕСЛИ ОДНИ ПОСТАВИТЬ НА ПОЛ, А ДРУГИЕ НА СТОЛ.

Социолог Льюис Мамфорд писал, что «не паровой двигатель, а часы стали ключевым инструментом современной эры индустриализации»¹⁷³. И если часы были ключевым инструментом эры индустриализации, они уж точно остаются ключевым инструментом эры информатики. Часы определяют наше поведение в каждое мгновение жизни. Деловые совещания расписаны по минутам, сайты быстрых знакомств настроены с точностью до трех минут, а укорочение длительности желтого сигнала светофора может привести к массовому недовольству из-за учащения случаев проезда на красный свет¹⁷⁴. Важнее всего, что главный двигатель эры информатики, компьютер, не может существовать без современных часовых механизмов. Часы не только синхронизируют поведение людей, но и обеспечивают миллиарды операций, которые компьютеры производят каждую секунду.

СЕГОДНЯ МЫ НАУЧИЛИСЬ ИЗМЕРЯТЬ ВРЕМЯ ТОЧНЕЕ, ЧЕМ ЛЮБЫЕ ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ. ВРЕМЯ ОДОЛЕЛО ПРОСТРАНСТВО: ТЕПЕРЬ МЕТР ОПРЕДЕЛЯЕТСЯ КАК РАССТОЯНИЕ, КОТОРОЕ СВЕТ ПРОХОДИТ ЗА 1/299792458 ЧАСТЬ СЕКУНДЫ.

В каком-то смысле человек слишком преуспел в своем стремлении научиться определять время. Столетия назад часы редко согласовывались друг с другом. Но мы совершили полный круг, и теперь проблема заключается в другом: наши часы слишком точны. Из общей теории относительности Эйнштейна следует, что время, определяемое любыми часами, подвержено влиянию сил тяготения. Поэтому одни и те же атомные часы будут тикать быстрее на космическом спутнике, чем на Земле (система GPS должна учитывать этот эффект). Вообще говоря, показания двух самых современных оптических атомных часов будут расходиться, если одни поставить на пол, а другие на стол. Какие из них будут показывать правильное время? Далее мы с вами увидим, что так ставить вопрос некорректно.

Сегодня мы научились измерять время точнее, чем любые другие параметры. Время одолело пространство: теперь метр определяется как расстояние, которое свет проходит за 1/299792458 часть секунды¹⁷⁵. Однако поражает не фантастическая точность современных часов, а диапазон измерений. Для определения массы крупинки соли, человека или грузовика нужны весы трех разных типов. А вот атомные часы можно использовать для измерения наносекундных различий в поступлении спутниковых радиосигналов GPS и времени ежегодного

¹⁷³ Mumford, 1934/2010, 14.

¹⁷⁴ <http://www.chicagotribune.com/news/chi-yellow-light-standard-change-20141010-story.html> (2/17/2015).

¹⁷⁵ Lombardi, 2002.

оборота Земли вокруг Солнца (и чтобы добавить недостающие секунды, когда Земля вращается медленнее: вращение Земли нерегулярно из-за воздействия геологических и климатических факторов). Никакое другое устройство, задуманное и, более того, реализованное человеком, не имело такой точности и такого диапазона измерений, как современные часы. Однако если оставить в стороне фантастические технические достижения, способность определять время не подвела нас ближе к ответу на вопрос о природе времени. Почему время течет только в одну сторону? Действительно ли будущее и прошлое принципиальным образом отличаются от настоящего? Или это только обман человеческого мозга? Об этом мы и поговорим в следующих главах.

8:00

ЧТО ЖЕ ЭТО ЗА ШТУКА – ВРЕМЯ?

Из всех препятствий на пути глубокого постижения жизни ни одна проблема не является столь же ужасной, как проблема «времени». Как объяснить время? Никак, если не объяснить жизнь. Как объяснить жизнь? Никак, если не объяснить время. Раскрытие глубокой и скрытой связи между временем и жизнью... это дело будущего.

ДЖОН УИЛЕР¹⁷⁶

Человеческий мозг придумал, как создать атомные часы, разделить атомы на составляющие их элементы, путешествовать на Луну и обратно, пересаживать гены и органы от одного существа другому и даже начал постигать механизмы собственного функционирования. Эти впечатляющие достижения иногда заставляют нас забывать, что мы всего лишь необычно умные обезьяны.

Головной мозг – продукт достаточно случайных вариаций эволюционного процесса. На протяжении почти 70 млн лет мозг приматов формировался таким образом, чтобы они могли ловко орудовать большими пальцами, распознавать объекты, узнавать друг друга и создавать социальные связи, повышающие вероятность выживания и воспроизведения. Можно с полной уверенностью сказать, что в тот период не было значительного селективного давления¹⁷⁷, заставлявшего приматов учиться читать или выводить теорему Пифагора. Эти навыки – результат продолжающегося процесса развития вычислительных способностей нашего (человеческого) мозга. Но при этом мозг сохраняет множество странностей, ограничений и предубеждений. Вот наглядный пример того, как мозг слабовато справляется с некоторыми мыслительными операциями. Попробуйте в уме сложить такую последовательность чисел:

1000 +
40 +
1000 +
30 +
1000 +
20 +
1000 +
10

Очень часто вместо правильного ответа 4100 люди получают ответ 5000. Почему мозг так слаб в подобных простых расчетах, но при этом справляется с гораздо более сложными задачами, такими как распознавание лиц или чтение книг? Стандартный, но лишь частичный,

¹⁷⁶ Джон Уилер (1911–2008) – знаменитый американский физик-теоретик; автор многочисленных физических терминов, в том числе «черная дыра» и «кротовая нора». – Прим. перев.

¹⁷⁷ То есть давления со стороны естественного отбора. – Прим. ред.

ответ заключается в том, что не существует весомого селективного давления для развития способности осуществлять численные расчеты. Полный ответ несколько сложнее. Строительные кирпичики любого вычислительного устройства – головного мозга или компьютера – определяют, насколько хорошо (или плохо) это устройство может решать ту или иную задачу. Ни один человек никогда не превзойдет простейший компьютер по умению осуществлять деление столбиком, поскольку нейроны работают медленно и подвержены влиянию большого количества помех. У них нет той скорости и способности переключаться, как у транзисторов цифровых компьютеров¹⁷⁸.

Численные вычисления, запоминание случайных последовательностей слов или быстрое определение вероятности выпадения двух «орлов» при подбрасывании четырех монет относятся к числу проблем, для решения которых мозг слабо приспособлен. Учитывая это, можно задуматься над тем, не тормозят ли эти естественные ограничения работы мозга прогресс науки. Как структура мозга влияет на нашу способность отвечать на вопросы, для решения которых он не был приспособлен? В частности, мозг, совершенно очевидно, не эволюционировал для понимания собственного функционирования. Еще один такой вопрос – это природа времени.

ЕЩЕ РАЗ О ПРЕЗЕНТИЗМЕ И ЭТЕРНАЛИЗМЕ

Люди пытаются все точнее и точнее определять время. Как мы установили в предыдущей главе, в этом направлении достигнуты блестящие успехи, однако успешность точного определения времени не повлияла на решение вопроса, *что именно мы определяем*.

Что такое время? Я не имею в виду *часовое* или *субъективное время*, но *время* в самом глубоком смысле слова: какова природа времени? У философов и физиков на этот счет имеется несколько теорий¹⁷⁹. Некоторые теории являются взаимоисключающими, а некоторые – лишь легкие вариации одной и той же темы. Однако, как мы обсуждали в первой главе, два основных направления мысли отражаются в концепциях *презентизма* и *этернализма*.

В КОНТЕКСТЕ ПРЕЗЕНТИЗМА ВЫРАЖЕНИЕ «ДИНОЗАВРЫ СУЩЕСТВУЮТ» ЛОЖНО. НО В КОНТЕКСТЕ ЭТЕРНАЛИЗМА МОЖНО УТВЕРЖДАТЬ, ЧТО ОНО СПРАВЕДЛИВО, ПОСКОЛЬКУ ДИНОЗАВРЫ ДЕЙСТВИТЕЛЬНО СУЩЕСТВУЮТ В КАКОЙ-ТО МОМЕНТ ВРЕМЕНИ, КОТОРЫЙ СТОЛЬ ЖЕ РЕАЛЕН, ЧТО И НАСТОЯЩИЙ МОМЕНТ.

Напомню, что в рамках *презентизма* реально только настоящее: все сущее есть только в бесконечном настоящем. Прошлое – это уже несуществующая конфигурация вселенной, а будущее – пока неизвестная конфигурация. В рамках *этернализма* время *распространено* по бесконечной шкале, так что прошлое, настоящее и будущее реальны в одинаковой степени. Вселенная в таком случае представляет собой четырехмерный «блок» с одним временным и тремя пространственными измерениями – так называемый «*блок вселенной*»¹⁸⁰.

Пониманию концепций презентизма и этернализма мешает запутанная терминология. К примеру, такие термины, как «реальный» или «существовать» в рамках этих концепций могут иметь разный смысл. В контексте презентизма выражение «динозавры существуют» ложно. Но в контексте этернализма можно утверждать, что оно справедливо, поскольку динозавры действительно существуют в какой-то момент времени, который столь же реален, что и настоящий момент. Так что вместо того, чтобы определять суть концепций презентизма и этернализма в

¹⁷⁸ Этот пример и связанные с ним вопросы я обсуждал в моей предыдущей книге (Буономано, 2011).

¹⁷⁹ Замечательный обзор различных взглядов на природу времени: Callender, 2010b.

¹⁸⁰ Smolin, 2013.

терминах типа «реальность» и «существование», лучше определим сами эти термины в рамках презентизма и этернализма.

В рамках презентизма *реальность* – это то, что существует сейчас и только сейчас, поскольку настоящее время – единственное время, в котором что-то существует. Напротив, для сторонников этернализма *реальность* может означать нечто, что существует в какой-то момент времени в какой-то точке «блока вселенной», включая динозавров и ваших будущих потомков.

Человеческая речь отражает концепцию презентизма. Например, для изменения глаголов по временам отправной точкой является форма настоящего времени. Вообще говоря, философы связывают презентизм и этернализм с *временным* (tensed) и *безвременным* (untensed) подходом к описанию событий. Временной подход всегда основан на настоящем.

Так, предложение «Я ходил в спортзал сегодня утром и вчера утром» описывает события прошлого в контексте настоящего. Это предложение верно сегодня, но совсем не обязательно будет верно завтра (уж поверьте мне), и совершенно точно не было верно 100 лет назад.

Напротив, такое сухое отражение событий, как «8 утра 1 января 2016 г., я в спортзале; 8 утра 2 января 2016 г., я в спортзале», является примером безвременного подхода. Если это утверждение справедливо сегодня, оно будет справедливо и завтра, и в каком-то смысле было бы справедливо 100 лет назад. События рассматриваются в некоем континууме, как соседние клетки календаря. Время как бы «опространствливается».

КОМУ ОНО НУЖНО, ЭТО ВРЕМЯ?

Существуют такие теории относительно природы времени, которые не укладываются в строгие рамки презентизма или этернализма. Например, физик Джордж Эллис относится к разряду тех, кто предлагает компромисс: четырехмерный «блок вселенной», в котором есть только настоящее и прошлое, но нет будущего. В рамках этой теории *эволюционирующего «блока вселенной»* настоящее представляет собой кромку волны, которая постепенно внедряется в неопределенное будущее и превращает его в разрастающееся и неизменное прошлое¹⁸¹.

Другие ученые считают, что время – всего лишь абстрактная и полезная концепция, позволяющая объяснять механизмы устройства вселенной. Но, в отличие от массы или энергии, время не относится к числу важнейших физических параметров. Чтобы понять эту точку зрения, вспомним, что на практике часовое время всегда определяют по изменению показаний. Вне зависимости от того, точны или неточны ваши часы, они всегда измеряют изменение какого-то физического параметра. Поэтому время всегда можно выразить через какие-то другие физические величины.

Например, кварцевые часы часто отмеряют время на круглом циферблате, и когда минутная стрелка продвигается от 12 до 6, мы говорим, что прошло 30 минут. Но ведь вместо этого можно сказать, что стрелка отклонилась на 180°. А в случае часов с маятником, колеблющемся с частотой 1 Гц, можно сказать, что маятник совершил 1800 колебаний.

Вообще говоря, стандартная единица измерения времени (секунда) теперь по определению составляет 9192631770 периодов колебания, соответствующих резонансной частоте атома цезия 133, а это приблизительно равно времени поворота Земли вокруг своей оси на 1/240 градуса. На Зимних Олимпийских играх 2014 г. в соревнованиях по скоростному спуску для преодоления траектории лыжникам требовалось 126 этих единиц времени. Этим примером я хочу показать, что часовое время можно рассматривать в качестве условной единицы для стандартизации изменений.

¹⁸¹ Ellis, 2014.

Время очень удобно использовать для определения соотношений скоростей самых разных физических процессов (сторонников такого воззрения иногда называют *реляционистами*). Вот как выразился физик XIX в. Эрнст Мах: «Мы не можем измерять изменения вещей посредством времени. Напротив, время – это абстракция, к которой мы приходим через [наблюдение] за изменением вещей»¹⁸².

Когда в предыдущих главах мы обсуждали, как мозг определяет время, мы в неявном виде уже использовали представление о том, что время – это мера изменения состояния физических систем. Как мы используем в качестве таймера расходящиеся по воде круги от упавшей капли дождя, так наш мозг использует динамические изменения сети нейронов для определения корреляций между состояниями сети и изменениями, происходящими во внешнем мире. Так что задача ежесекундно стучать по клавише пальцем сводится к согласованию изменений в головном мозге с изменениями показаний часов, изготовленных руками человека. В конечном итоге, говоря о том, что мозг определяет время, мы имеем в виду именно это¹⁸³.

Мешанина концепций и теорий относительно природы времени (презентизм, этернализм, временной и безвременной подход, эволюционирующий «блок вселенной», реляционизм и др.) говорит лишь о том, что у нас нет точного представления относительно природы времени. Но если все же попытаться выделить наиболее популярную теорию в физике и философии, то это, безусловно, этернализм.

Заметим, однако, что эта теория полностью противоречит интуиции: она ставит под сомнение одно из наиболее универсальных человеческих ощущений, заключающееся в том, что настоящее – это зона контакта между прошлым, которого уже нет, и неизвестным будущим, которое только должно наступить. Этернализм не соответствует нашему субъективному ощущению течения времени, поскольку в рамках этой концепции все моменты времени одинаково реальны, как все точки пространства. По этой причине у философов и физиков должны иметься достаточно веские причины для принятия концепции этернализма. Далее мы обсудим две такие причины. Я назову их: 1) в соответствии с законами физики *сейчас* – условно выбранный момент времени, как *здесь* – условно выбранная точка пространства; 2) из специальной теории относительности Эйнштейна вытекает, что все моменты времени встроены во временную ось «блока вселенной».

НЕЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ КО ВРЕМЕНИ

Наши успехи в постижении основополагающих законов мироздания, возможно, являются самым главным интеллектуальным достижением человечества. Законы физики обладают настолько невероятной силой, что смогли ответить на вопросы, с которыми древние люди когда-то обращались к богам. Что это за светящиеся точки на ночном небе? Почему Солнце восходит и заходит? Мы больше не связываем затмения, стихийные бедствия и капризы погоды с прихотями тысяч божеств, которым поклонялись на протяжении многих тысячелетий.

Первый шаг в этом направлении сделал Ньютон. Он описал законы, управляющие поведением предметов в нашей каждодневной реальности – от падения яблока до движения планет. Создав специальную и общую теорию относительности, Эйнштейн расширил (и исправил) законы Ньютона. Эйнштейн снабдил нас необходимыми инструментами для постижения космических событий, произошедших после Большого взрыва, и помог осознать, что время и пространство связаны между собой, а сила тяготения существует только в пространственно-временном измерении.

¹⁸² Barbour, 1999, 67.

¹⁸³ Muller and Nobre, 2014.

Однако, в отличие от планет и звезд, субатомные частицы, по-видимому, имеют свой собственный свод законов, пренебрегающий открытиями Эйнштейна. Эти законы были определены квантовой механикой в первые десятилетия XX в. В сверхъестественном квантовом мире частицы существуют в суперпозиционных состояниях (по-видимому, одновременно находясь в разных точках пространства) и постоянно влияют друг на друга, даже находясь на расстояниях в несколько световых лет.

Но законы физики, при всем невероятно сильном влиянии на нашу жизнь, не в состоянии объяснить одно из наиболее воспроизводимых наблюдений человека: настоящий момент времени отличается от всех остальных. Вот что пишет современный философ Крейг Каллендер: «Уравнения физики не объясняют, какие события происходят прямо сейчас – они похожи на карту, на которой нет кружочка с надписью «вы находитесь здесь». В них нет настоящего момента времени и, следовательно, нет течения времени».

Фундаментальные законы физики также ничего не говорят о том, почему нам кажется, что время движется вперед. Уравнения Ньютона и Эйнштейна, уравнения Максвелла (описывающие законы электричества и магнетизма) и квантовое уравнение Шредингера не зависят от того, развиваются ли события в «прямом» или «обратном» порядке¹⁸⁴. Такие уравнения называют *симметричными относительно времени*. Это означает, что как движение из Лос-Анджелеса в Сан-Франциско эквивалентно движению из Сан-Франциско в Лос-Анджелес, так и законы Ньютона одинаково точно описывают процессы, протекающие в прямом и обратном направлении.

Представьте себе фильм, в котором показывают вращение Луны вокруг Земли, которая, в свою очередь, вращается вокруг Солнца. Этот сложный танец можно описать математическим образом с помощью законов Ньютона. Иными словами, используя серию уравнений, можно смоделировать движение этих трех небесных тел. Но представьте себе, что после того, как мы проделали эту работу, выяснилось, что фильм прокручивали в обратном направлении. Нам придется выбросить все наши результаты? Нет. Все уравнения будут верны, и нужно лишь изменить знак перед переменной t , чтобы указать на «прямое» направление движения тел по орбитам¹⁸⁵. Аналогичным образом, если мы обнаружим, что составляли уравнения для фильма, отснятого тысячу лет назад, наши уравнения по-прежнему не потеряют силу. Законы Ньютона нечувствительны к направлению времени: они верны в прошлом, в настоящем и в будущем. И то же самое можно сказать об уравнениях теории относительности и квантовой механики. Законы физики не придают особого значения направлению времени и не выделяют какой-то особый момент. Для них прошлое, настоящее и будущее эквивалентны между собой.

УПРЯМАЯ СТРЕЛА ВРЕМЕНИ

Наверное, вы думаете: *Ну, хорошо, я допускаю, что законы физики, управляющие движением планет, могут быть справедливы в обоих направлениях – вообще говоря, движение планет по орбитам кажется в одинаковой степени вероятным в прямом и в обратном направлении. Однако законы физики должны запрещать невозможные вещи, о которых я знаю из собственного опыта. Лопнувший шарик не наддувается вновь, разбитое стекло не восстанавливается, а кубики льда в чае в конечном итоге всегда расплавляются. Кажется, законы физики постулируют невозможность обратных процессов!* Вы удивитесь, но это не так.

Ответ на загадку о направленности времени был предложен австрийским физиком XIX в. Людвигом Больцманом. Из его статистической интерпретации второго начала термодинамики

¹⁸⁴ Penrose, 1989.

¹⁸⁵ Чтобы сменить направление процессов в электромагнетизме и квантовой механике, придется обратить еще некоторые параметры.

следует, что энтропия любой изолированной системы со временем увеличивается. Энтропию можно воспринимать как степень беспорядка. Например, если бросить в коробку 10 игральных костей и потрясти, кости рассыплются в беспорядке («случайным образом»), и можно сказать, что такая система характеризуется высоким значением энтропии. Но если аккуратно построить из этих костей башню, система принимает упорядоченную конфигурацию с низким значением энтропии.

Чтобы понять связь между энтропией и направлением времени, давайте представим себе, что в левой части коробки у нас содержатся два атома водорода (позднее мы вернемся к вопросу о *наиболее вероятном расположении двух атомов в левой или в правой части коробки*). На следующем этапе возможны три состояния (конфигурации) системы: оба атома оказываются слева (ЛЛ), оба справа (ПП) или один слева, а другой справа (поскольку атомы идентичны, состояния ЛП и ПЛ неразличимы). Вероятность каждого состояния следующая: $\frac{1}{4}$ для ЛЛ, $\frac{1}{4}$ для ПП и $\frac{1}{2}$ для ЛП или ПЛ. Таким образом, наиболее вероятен случай, когда атомы распределены в коробке равномерно, поскольку есть два пути достижения этого состояния. Если мы, обнаружив это равномерное распределение, заглянем в коробку снова, с довольно высокой вероятностью мы увидим, что система вернулась к исходному состоянию, когда оба атома находятся в левой части коробки: вероятность такого события составляет $\frac{1}{4}$. Если бы коробка имитировала всю вселенную, мы бы сказали, что вселенная вернулась в прошлое: ее теперешнее состояние неотличимо от исходного состояния (в нашем грубом приближении, когда мы не пытаемся определить точную локализацию атомов).

Но если мы поместим в левую часть коробки 10 000 атомов водорода (что по-прежнему немного) и подождем, пока атомы распределятся более или менее равномерно, вероятность того, что в какой-то момент они окажутся в исходном состоянии, ничтожно мала – намного меньше 1/гугол (гугол = 10^{100} , что больше общего числа частиц во вселенной). Так что, когда мы говорим о низкой вероятности возвращения всех атомов в исходное состояние, это не то же самое, что низкая вероятность выигрыша в лотерею или даже еще более низкая вероятность еженедельного выигрыша в лотерею на протяжении месяца. Вероятность возвращения атомов в коробку к исходному состоянию можно сравнить с вероятностью того, что раз в неделю на протяжении месяца ветер будет забрасывать к вам в окно выигрышный билет (понятное дело, я не знаю, как рассчитать вероятность такого события, я лишь хочу сказать, что этого не произойдет). Ничтожно малая вероятность возвращения атомов в исходное состояние имеет очень большое значение, поскольку указывает на то, что атомы не могут «вернуться в прошлое» и, следовательно, время приобретает направленность.

Второе начало термодинамики – закон второго рода, нежели закон сохранения энергии. Скорее, это статистическая основа утверждения, что, хотя возвращение изолированной системы к исходному состоянию крайне маловероятно, физика этого не запрещает. Так что, если у вас на глазах разбитый стакан собирается из осколков и сам впрыгивает на стол, это не является нарушением законов физики, и Ньюто́ну или Эйнштейну не придется ворочаться в гробу. Кто сказал, что это невозможно? Когда стакан упал на пол и разлетелся на куски, его потенциальная энергия превратилась в кинетическую энергию, ускорившую движение молекул воздуха (отсюда звук бьющегося стекла). В соответствии с законом сохранения энергии общее количество энергии в системе сохранилось (у этого закона нет исключений), и теоретически ничто не мешает всем этим молекулам воздуха возвратиться к исходной конфигурации и передать то же количество энергии осколкам, которые соберутся в единое целое и вернуться на стол в виде стакана.

Поэтому второе начало термодинамики не запрещает надуваться лопнувшим шариком, восстанавливаться разбитым стаканам или не плавиться кусочкам льда, но оно делает другое: этот закон фактически обеспечивает невозможность этих процессов. Эта концепция так называемого *энтропийного времени* достаточно хорошо объясняет, почему все события в мире

имеют временную направленность. Однако, к сожалению, сама по себе стрелка энтропийного времени вовсе даже и не стрелка, как казалось вначале.

ДВУНАПРАВЛЕННАЯ СТРЕЛКА

Теперь представьте себе, что в нашей коробке содержится 10 атомов водорода, и в какой-то момент времени (время t) четыре атома водорода находятся слева, а шесть справа; обозначим это состояние [4, 6]. Нам известно, что система обладает максимальной энтропией, когда с каждой стороны находится по пять атомов ([5, 5]), поскольку существует больше способов распределить атомы в две группы по пять, чем каким-то иным образом. Так что в следующий момент времени (время t_{+1}) мы с большей вероятностью будем наблюдать состояние [5, 5] (с повышением энтропии), чем состояние [3, 7].

Но давайте заглянем не в будущее, а в прошлое, и зададим вопрос, каким было наиболее вероятное состояние системы в предыдущий момент времени (время t_{-1}). Исходя из тех же логических соображений, ответ будет таким же: наиболее вероятным было состояние [5, 5]. Таким образом, если у нас нет никакой другой информации об этой системе, и наиболее вероятным состоянием после состояния [4, 6] является состояние [5, 5], то наиболее вероятным предыдущим состоянием тоже является состояние [5, 5]. Заметьте, что в данном случае я не утверждал, что в исходном состоянии все атомы находились в одной и той же части коробки; вполне возможно, что все началось с состояния [5, 5], а состояние [4, 6] было лишь флуктуацией.

Вот так так! Если мы используем второе начало термодинамики для определения направленности времени, довольно неприятно осознавать, что оно предсказывает рост энтропии не только в будущем, *но и в прошлом*. Кажется, что энтропийное время имеет два направления. Термодинамическое обоснование одно-направленности времени имело смысл лишь по той причине, что в нем было одно скрытое допущение. В первом примере мы начали рассуждения с такого состояния системы, когда все атомы находились в одной и той же части коробки, т. е. с состояния с очень низким значением энтропии. Если начинать с состояния с самой низкой энтропией, она, естественно, может *только возрасть*. Так что второе начало термодинамики определяет направление движения времени при условии, что система (вселенная) начинается с состояния с низким значением энтропии.

Иногда говорят, что время, как и все остальное, началось с момента Большого взрыва примерно 14 млрд лет назад, и что сразу после Большого взрыва вселенная действительно находилась в состоянии с очень низким значением энтропии. Тогда возникает вопрос: *как вселенная пришла к этому исходному состоянию с низким значением энтропии?*

Людвиг Больцман понимал всю серьезность этого вопроса и выдвинул разумную гипотезу, заключающуюся в том, что состояние вселенной с низким значением энтропии было лишь временной флуктуацией. Если вам кажется, что эта гипотеза идет вразрез с им же установленным законом, то дело заключается в неверном прочтении закона. Как мы уже говорили, второе начало термодинамики – статистический закон: снижение энтропии маловероятно, но не невозможно, а при наличии достаточного количества времени маловероятное может стать вероятным.

Более современная гипотеза, объясняющая загадку низкой энтропии, сводится к идее *мультивселенной*, в соответствии с которой наша вселенная началась как некий участок пространства с низким уровнем энтропии в гораздо более объемной множественной вселенной¹⁸⁶. Пока не существует единой общепринятой теории, объясняющей происхождение вселенной,

¹⁸⁶ Прекрасный обзор материала о загадках и теориях возникновения вселенной и направленности времени: Carroll, 2010.

начиная с состояния с низким значением энтропии, и маловероятно, что в ближайшее время мы поймем механизмы происхождения вселенной и, следовательно, происхождения времени.

Второе начало термодинамики предлагает ответ на вопрос о причине направленности времени или как минимум объясняет постоянное нарастание энтропии вселенной, начиная от состояния с низким уровнем энтропии в момент Большого взрыва. Но существуют и другие гипотезы, пытающиеся объяснить причины направленности времени. Одна из них заключается в том, что необратимость процессов во времени (наличие «стрелки времени») вытекает из законов квантовой механики.

Я уже упомянул, что все законы физики, включая законы квантовой механики (уравнение Шредингера), симметричны по отношению ко времени, и это действительно так. Однако в квантовой механике существует проблема, которая выходит за рамки уравнения Шредингера и мучает ученых уже около сотни лет.

Если мы направляем на фотопластинку отдельный электрон, в соответствии с уравнением Шредингера мы можем рассчитать вероятность нахождения электрона в момент времени t . Но для точного определения положения электрона нужно произвести измерения, а уравнение Шредингера ничего не говорит о том, что происходит в момент осуществления этих измерений. Пока измерения не сделаны (например, не определена точка соприкосновения электрона с фотопластинкой), говорят, что электрон может одновременно находиться во всех разрешенных позициях. И только сам акт измерения положения электрона заставляет его принять какое-то определенное положение: физики говорят, что акт измерения вызывает коллапс *волновой функции* электрона. Однако ученые пока не пришли к единому мнению относительно того, что именно в акте измерения приводит к коллапсу (если вообще приводит). Некоторые физики полагают, что этап измерения квантово-механического процесса накладывает на вселенную вектор времени¹⁸⁷. При такой интерпретации квантовой механики, как только положение электрона определено, пути назад не существует. После осуществления измерения нельзя использовать уравнение Шредингера, чтобы показать, откуда взялся электрон¹⁸⁸.

Но даже если квантовая механика подразумевает наличие у вселенной вектора времени (хотя многие считают, что это не так), факт остается фактом: ни квантовая механика, ни какие-либо другие законы физики не придают специфического значения *настоящему моменту времени*¹⁸⁹. Из основополагающих законов физики следует, что *сейчас* на шкале *времени* – то же, что *здесь* в области *пространства*. Именно по этой причине многие физики и философы считают, что мы живем в «блоке вселенной» этернализма. Однако для большинства людей, к которым отношусь и я, не это является наиболее серьезным аргументом в пользу этернализма. Я

¹⁸⁷ Джордж Эллис – один из тех, кто считает, что квантовые расчеты подтверждают направленность времени (Ellis, 2008). Замечательные обзоры о проблемах измерений в квантовой механике и об обратимости этих измерений: Penrose, 1989, and Greene, 2004.

¹⁸⁸ Речь идет о знаменитом эксперименте с двумя щелями, в котором показано, что электрон проходит-таки через обе щели. В частности, даже если выпускать из пушки по одному электрону, на детекторном экране наблюдается картина интерференции. Например, когда открыта лишь одна щель, на экране существует некая точка Р, в которой оказывается некий процент Х электронов. Если же открыты обе щели, логично предположить, что в этой точке окажется такая же или большая часть электронов. Однако возникает интерференционная картина, и, следовательно, в точку Р попадает меньше электронов. Таким образом, кажется, что электроны ведут себя как волны и интерферируют друг с другом до того момента, пока не производится измерение, влекущее за собой коллапс волновой функции. Тем не менее, когда детекторы ставят у обеих щелей, электрон регистрируется либо у одной, либо у другой щели. Существует множество великолепных научно-популярных книг, разъясняющих странности квантового мира; см., например, Rae, 1986; Greene, 2004; Carroll, 2010.

¹⁸⁹ Хуже того, уравнение Уилера–Де Витта – результат слияния квантовой механики и общей теории относительности – идет еще дальше и указывает на существование вселенной, в которой время вообще отсутствует (Barbour, 1999).

бы сказал, что наиболее веской причиной принять концепцию этернализма является теория относительности Эйнштейна.

9:00

ОПРОСТРАНСТВЛИВАНИЕ ВРЕМЕНИ В ФИЗИКЕ

Мы, физики, считаем, что деление на прошлое, настоящее и будущее есть всего лишь устойчивая иллюзия.

АЛЬБЕРТ ЭЙНШТЕЙН¹⁹⁰

Одна из вещей, которая меня привлекает в баскетболе, заключается в том, что это игра против времени. Игрок, делающий последний бросок, должен выпустить мяч из рук до того, как истечет время игры и раздастся финальный свисток. Если мяч отделяется от руки до окончания времени игры, бросок засчитывается. Нам кажется, что определение порядка этих событий (звук свистка и отделение мяча от руки игрока) является объективной проблемой. Однако выясняется, что это не так.

Давайте проведем мысленный эксперимент и предположим, что, по мнению судьи, победный мяч отделился от руки игрока, находящегося в одной части поля, до того, как атомные часы в другой части поля показали конец игры. Используя высокоточное оборудование, судья позднее подтверждает, что от момента броска до окончания игры оставалась еще целая наносекунда (миллиардная доля секунды). Теперь допустим, что это была седьмая игра финала НБА¹⁹¹, и за ней через телескоп наблюдал космонавт, находившийся на космическом корабле, который двигался с фантастической скоростью, равной половине скорости света¹⁹². Узнав о решении судьи, космонавт приходит в изумление, поскольку видел своими глазами, что часы показали окончание игры *до того*, как игрок выпустил мяч из рук, и, следовательно, этот бросок не должен засчитываться. Спор относительно того, засчитывается ли мяч, и какая команда победила, не имеет никакого отношения к тому, как скоро информация дошла до космического корабля (считаем, что обе стороны это учитывают); вопрос лишь в том, что у нас есть две равноправные реальности: в одной победившая команда действительно победила, а в другой произошла судебская ошибка.

Как это возможно? Может ли быть, что два события происходят в одном порядке для одного наблюдателя и в другом для другого? И если это так, что это говорит о природе времени? Чтобы ответить на эти вопросы, следует обратиться к специальной теории относительности.

СПЕЦИАЛЬНАЯ ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

Скромное название статьи Эйнштейна «К электродинамике движущихся тел» не позволяло предугадать, что эта статья изменит ход развития науки. В статье Эйнштейн изложил специальную теорию относительности и обосновывал ее, исходя из двух принципов.

Первый принцип заключался в том, что *законы физики едины для всех наблюдателей, движущихся с постоянной скоростью*¹⁹³. Этот так называемый *принцип относительности* Эйнштейн позаимствовал у Галилея, который указывал, что наблюдатель, находящийся в море на движущемся с постоянной скоростью корабле, не может однозначно определить, движется

¹⁹⁰ Zeh, 1989/2007, 199.

¹⁹¹ В Национальной баскетбольной ассоциации (НБА) седьмая игра является завершающим матчем в серии игр; она проводится в том случае, если в предыдущих шести играх ни одна из команд не смогла получить преимущество. – *Прим. перев.*

¹⁹² Это мысленный эксперимент, так что лучше не вдаваться в детали по поводу того, относительно какой точки мы проводим измерения, не учитывать скорость космического корабля, вращение Земли и тот факт, что в баскетбол обычно не играют на открытых стадионах.

¹⁹³ Точнее, для всех наблюдателей, равномерно движущихся в инерциальной системе координат.

он или нет. Возможно, вам знакомо это ощущение, когда, внезапно очнувшись в самолете, вы не можете сразу сообразить, летите вы, вырубаете на взлетно-посадочную полосу или стоите. Принцип относительности заставляет нас определять скорость движения по отношению к чему-то еще. Когда мы говорим, что машина едет со скоростью 100 км/ч, подразумевается, что мы соотносим скорость ее движения с покоящимися предметами на планете Земля, например, со знаком, ограничивающим скорость до 80 км/ч. Однако, строго говоря, абсолютного стандарта для сравнения не существует. Для приближающейся навстречу полицейской машины скорость движения данной машины будет намного выше 100 км/ч. Более того, вполне законно сказать, что машина покоится, а дорожный знак движется со скоростью 100 км/ч. Таким образом, скорость перемещения предмета всегда относительна и определяется в каком-то конкретном контексте. С одним только исключением...

Скорость света в вакууме постоянна и не зависит от движения испускающего свет тела. Это второй принцип в основе теории Эйнштейна. На первый взгляд утверждение, что скорость света постоянна, может показаться вполне безобидным, но вместе с принципом относительности оно опровергает концепцию абсолютного времени.

Чтобы оценить последствия второго принципа, давайте сначала договоримся по поводу определения скорости движения. Допустим, вы находитесь в поезде, движущемся со скоростью 100 км/ч, и стреляете из пистолета по направлению движения. Вы знаете, что пуля вылетает из пистолета со скоростью 300 км/ч, поэтому видите, как пуля удаляется от вас со скоростью 300 км/ч. Допустим также, что я наблюдаю за этой сценой с платформы и определяю скорость движения пули как 400 км/ч (скорость поезда плюс скорость пули)¹⁹⁴.

Теперь давайте рассмотрим тот же сценарий, но в контексте второго принципа Эйнштейна – принципа постоянства скорости света. Пусть ваш поезд движется с невообразимой скоростью 100 000 км/с (треть скорости света), и вы выпускаете из пистолета не пулю, а пучок лазерных лучей. Фронт света лазера удаляется от вас со скоростью 300 000 км/с (примерно скорость света, обозначим ее через c). Резонно предположить, что раз вы видите движение светового пучка со скоростью 300 000 км/с, я с платформы должен определить, что скорость движения фронта света составляет 400 000 км/с (скорость поезда плюс скорость света, $1,33c$). Однако в таком случае нарушается принцип постоянства скорости света, которая должна быть одинаковой для всех и равняться значению c вне зависимости от скорости движения остальных тел (кроме того, здесь нарушается соответствующий вывод теории относительности, заключающийся в том, что ничто не может двигаться быстрее скорости света). В результате для вас и для меня свет лазера будет двигаться с одной и той же скоростью.

На интуитивном уровне это совершенно непонятно. Вы легко определите, что через секунду фронт света окажется за 300 000 км от поезда. Поскольку я тоже вижу, что свет движется с той же скоростью, я могу сказать, что через секунду фронт света окажется в 300 000 км от моей платформы, а поскольку мне известно, что поезд идет со скоростью 100 000 км/с, он продвинется на 100 000 км. В результате для меня расстояние между поездом и фронтом света составит $300\,000 - 100\,000 = 200\,000$ км. Но вы только что подсчитали, что фронт света удалился от вас на 300 000 км! *Здесь что-то не так.* Попросту говоря, если скорость света абсолютна, то пространство и время – нет! Наши вычисления не сходятся по той причине, что мы оцениваем пространство и время по-разному.

Для Эйнштейна 1905 г. был «годом чудес»: он все еще работал в патентном бюро в Берне, но опубликовал четыре чрезвычайно важные статьи. В статье, посвященной специальной теории относительности, он вывел серию уравнений, описывающих растяжение времени (и сокращение пространства) в зависимости от скорости. Интересно, что эти уравнения называют пре-

¹⁹⁴ При низких скоростях это линейное приближение дает великолепное совпадение с реальной скоростью, которая, с учетом специальной теории относительности, составляет 399,999999999999 км/ч.

образованиями Лоренца, поскольку впервые их привел в своих работах голландский физик Хендрик Лоренц. Однако Лоренц не выявил всех следствий из этих уравнений и не понял, что их можно вывести из двух упомянутых выше принципов.

Стоит взглянуть на сокращенную версию преобразований Лоренца для времени¹⁹⁵, поскольку это одно из важнейших уравнений в истории изучения времени. Это всего-навсего алгебраическое уравнение, которое связывает время на ваших часах, когда вы перемещаетесь в поезде ($t^{\text{ВЫ}}$), со временем на моих часах, когда я стою на платформе ($t^{\text{Я}}$), при условии, что мы оба запустили часы ровно в тот момент, когда вы пронеслись мимо меня. В этом уравнении v – скорость нашего движения относительно друг друга, а c – скорость света:

$$t^{\text{Я}} = t^{\text{ВЫ}} / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}.$$

Поскольку c – гигантское число по сравнению с нашими привычными скоростями, параметр v^2/c^2 близок к нулю, и знаменатель близок к $\sqrt{1}$, т. е. к единице. Таким образом, значения $t^{\text{ВЫ}}$ и $t^{\text{Я}}$ приблизительно равны. Так обычно и бывает в жизни: все наши часы тикают с одинаковой скоростью и действуют синхронно, даже когда мы двигаемся, поскольку двигаемся мы с небольшими скоростями (по сравнению со скоростью света). Однако при скоростях, приближающихся к скорости света, часы будут идти по-разному.

Возвратимся к примеру, когда вы путешествуете в поезде, движущемся со скоростью, равной одной трети скорости света. Через секунду, отмеренную вашими часами ($t^{\text{ВЫ}} = 1$ с), мои часы покажут другое время ($t^{\text{Я}} = 1,06$ с). Разница небольшая, но если бы вы двигались со скоростью ближе к скорости света, скажем, $v = 0,999c$, за то время пока ваши часы отмерили бы год ($t^{\text{ВЫ}} = 1$ год), мои отмерили бы почти 22 года. В такой ситуации время для вас замедлилось: я постарел на 22 года, а вы – лишь на год¹⁹⁶.

Один из первых экспериментов по демонстрации замедления времени заключался в сравнении показаний атомных часов, находящихся на летящем самолете и на земле. Часы провели несколько сотен часов в самолетах, двигавшихся на восток (направление полета имеет значение из-за вращения Земли). Как и предсказывала специальная теория относительности, путешествовавшие часы отставали (на десятки миллиардных долей секунды) от атомных часов, находившихся дома, в военно-морской обсерватории в Вашингтоне¹⁹⁷.

¹⁹⁵ Предполагается, что мы синхронизируем часы в момент времени $t = 0$, когда находимся в одном и том же месте, и что мы определяем наше относительное положение в собственных системах координат: $x^{\text{ВЫ}} = x^{\text{Я}} = 0$.

¹⁹⁶ Подождите-ка, скажете вы. Если скорость между нами одинакова с обеих точек зрения, человек в поезде тоже рассчитает, что год моего времени соответствует 22 годам его времени. Этот вывод является основой так называемого парадокса близнецов. Сравнение показаний часов в разных точках пространства – весьма неблагодарная затея. Гораздо правильнее сравнивать показания часов (или возраст), когда оба наблюдателя опять сходятся в одной точке пространства – когда вы возвращаетесь на платформу. Тогда мы увидим, что человек из поезда намного моложе, чем тот, кто оставался на платформе. Причина этого расхождения заключается в том, что для человека в поезде изменилась система отсчета, а для человека на платформе она осталась прежней. В результате человек на платформе преодолел *большой отрезок* пространства-времени, чем человек в поезде, и этот отрезок соответствует часовому времени (так называемому собственному времени). По поводу парадокса близнецов см., например, Lockwood, 2005; Lasky, 2012.

¹⁹⁷ Hafele and Keating, 1972a, б. Понятное дело, Земля не является неподвижным объектом: в частности, она меняет свое положение по отношению к Солнцу. Но для наших целей мы можем считать центр Земли неподвижным началом координат. Поскольку Земля вращается, скорость самолета, движущегося на восток, складывается со скоростью вращения Земли, поэтому время в таком самолете идет быстрее, чем на Земле, и часы, следовательно, замедляются. Хафеле и Китинг также поместили часы на самолет, движущийся на запад. Поскольку направление движения самолета в этом случае противоположно направлению вращения Земли, наблюдалось предсказанное теорией относительности кинематическое ускорение. Кроме того, в само-

Этот и другие эксперименты подтвердили, что время – не абсолютная величина. Ньютон ошибался, утверждая что время «протекает само по себе, без всякого отношения к чему-либо внешнему».

ИСЧЕЗНОВЕНИЕ ОДНОВРЕМЕННОСТИ

Часовое время всегда измеряют по изменению какого-то показателя – будь то число колебаний маятника или концентрация белка Period в супраихазматических ядрах, а изменение – явление локальное. И нам легко понять, что скорость изменения тех или иных событий может быть подвержена влиянию локального окружения.

Отчасти именно поэтому человек изобрел холодильник: помидоры в холодильнике «стаеют» медленнее, чем на столе. Вообще говоря, время, измеряемое по колебаниям маятника или циркадным часам дрозофилы, тоже зависит от температуры. При этом температура по-разному влияет на показания разных типов часов, а на какие-то не влияет вовсе. Например, период полураспада радиоизотопов, о которых мы говорили в главе 7, почти одинаков при обычной температуре и вблизи абсолютного нуля.

Напротив, скорость движения влияет на все типы часов, и пренебрегать ею никак нельзя. Скорость любого физического процесса (ход атомных часов или метаболизм человека) изменяется в большую или меньшую сторону при изменении скорости перемещения тела. Сам этот факт может сбить с толку, но еще удивительнее его последствия для специальной теории относительности.

Давайте вернемся к нашему мысленному эксперименту с поездом и платформой и рассмотрим ситуацию с реальной скоростью движения. Представьте себе, что вы стреляете из пистолета, находясь в середине 400-метрового состава, движущегося со скоростью 200 м/с относительно платформы, на которой стою я (рис. 9.1). Как только головной вагон поезда оказывается напротив меня, вы стреляете одновременно из двух пистолетов: одна пуля летит в стекло первого вагона, а другая – в стекло последнего, и обе тоже движутся со скоростью 200 м/с. С вашей точки зрения обе пули движутся с одинаковой скоростью и преодолевают одно и то же расстояние, так что в окна первого и последнего вагона они врезаются одновременно – ровно через секунду после выстрела.

лете часы находятся под воздействием более слабого гравитационного поля, чем на Земле. Вклад гравитационной составляющей тоже учитывался и тоже совпал с теоретическими предсказаниями.

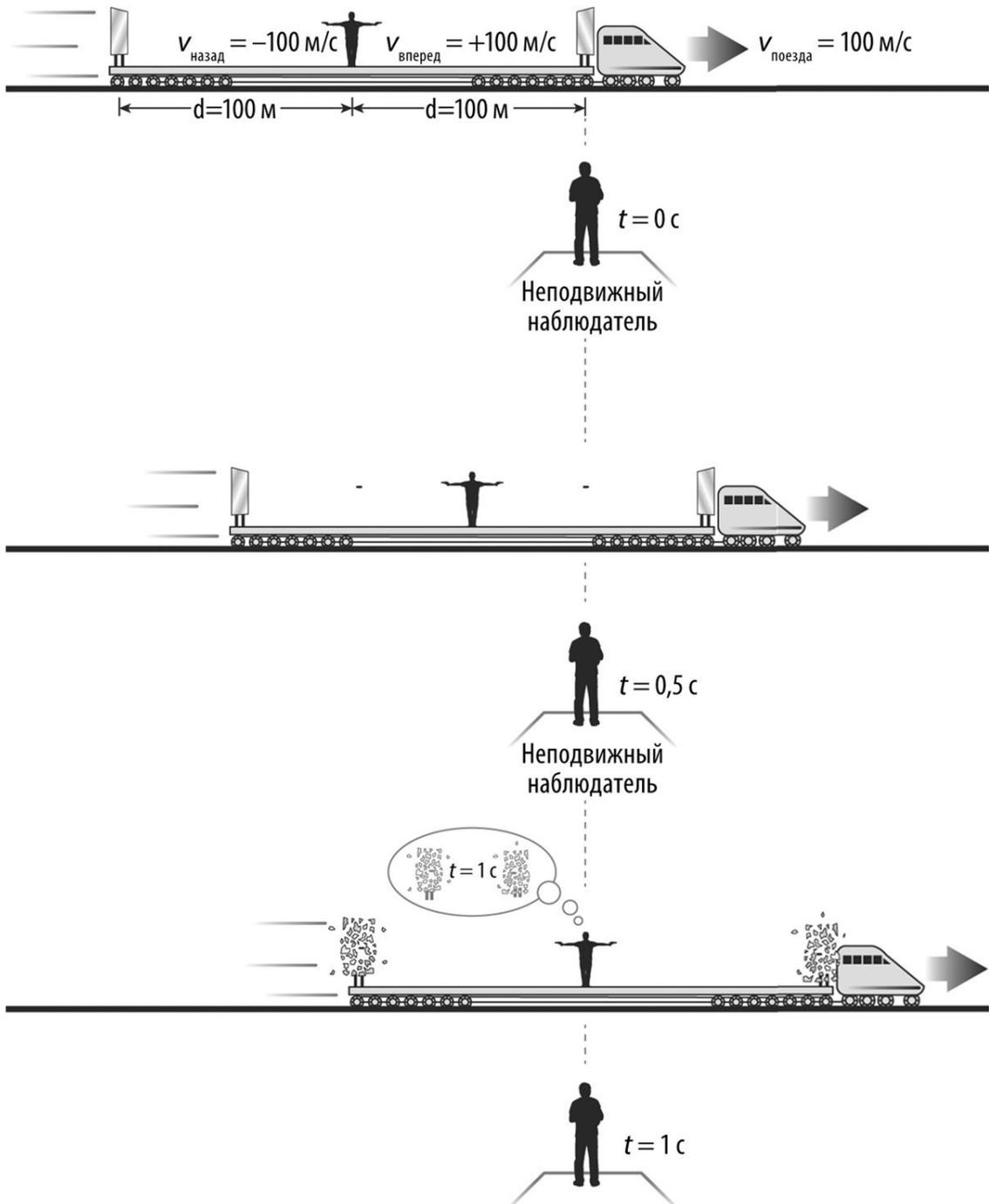


Рис. 9.1. Поезд Ньютона. В соответствии с законами Ньютона, если стоящий в середине поезда человек одновременно стреляет в противоположных направлениях в момент времени $t = 0$, стекла в первом и последнем вагоне разбиваются одновременно в момент времени $t = 1 \text{ с}$.

Я, стоя на платформе, вижу, что пуля, летящая по ходу поезда, движется со скоростью 400 м/с (скорость поезда плюс скорость пули), и переднее стекло разбивается через одну секунду, поскольку этой пуле приходится преодолевать расстояние в 400 м (половина длины поезда плюс расстояние, пройденное поездом за 1 с). А вот пуля, летящая в обратном направлении, движется со скоростью 200 м/с (скорость поезда) минус 200 м/с (скорость пули отрицательная, поскольку пуля летит в противоположном направлении по отношению к движению поезда). Иными словами, я вижу пулю неподвижно висящей в воздухе до тех пор, пока в нее не врежется стекло последнего вагона (красивее получится, если мы представим себе, что дело про-

исходит в вакууме на планете с небольшой силой тяжести). Столкновение тоже происходит через одну секунду, поскольку от точки, из которой произведен выстрел, стекло последнего вагона отделяло расстояние 200 м. Как и предполагал Ньютон, мы с вами оба видим, что стекла переднего и заднего вагонов разбиваются одновременно. В данном случае можно сказать, что эта одновременность является абсолютной: два события происходят одновременно как для вас, так и для меня.

Теперь давайте разберемся, что произойдет в таком же эксперименте, но при гораздо более высоких скоростях и гораздо больших расстояниях (рис. 9.2). Допустим, вы находитесь в поезде длиной 400 000 км, движущемся со скоростью 200 000 км/с ($2/3$ скорости света, $0,667c$)¹⁹⁸. Опять-таки, когда первый вагон пронесется мимо меня, вы стреляете из пока еще несуществующих пистолетов в окна первого и последнего вагонов. Поскольку вы находитесь в середине состава, вы видите, что окна разбиваются одновременно – ровно через секунду после выстрела, поскольку обе пули летят со скоростью 200 000 км/с и преодолевают расстояние 200 000 км. Как и в предыдущем эксперименте, я, со своей стороны, буду видеть посланную назад пулю висящей в воздухе (поскольку скорость пули равна скорости поезда с противоположным знаком) и надвигающееся на нее со скоростью 200 000 км/с стекло последнего вагона. Но какой будет скорость пули, летящей по направлению движения поезда? Чтобы оба окна разбились одновременно, летящая вперед пуля должна пролететь расстояние, равное всей длине поезда (половина поезда плюс пройденное поездом расстояние) за то же самое время, которое требуется заднему стеклу, чтобы достичь пули, летящей назад.

¹⁹⁸ Поскольку специальная теория относительности предсказывает, что при высоких скоростях время растягивается, а пространство сжимается, длина поезда с моей точки отсчета окажется больше. В нашем мысленном эксперименте для упрощения я игнорировал этот факт. Однако сокращение пространства не меняет результат, поскольку в моей системе координат вы по-прежнему находитесь в середине поезда, и пули начинают свой путь в обоих направлениях с одинакового расстояния по отношению к переднему и заднему стеклу.

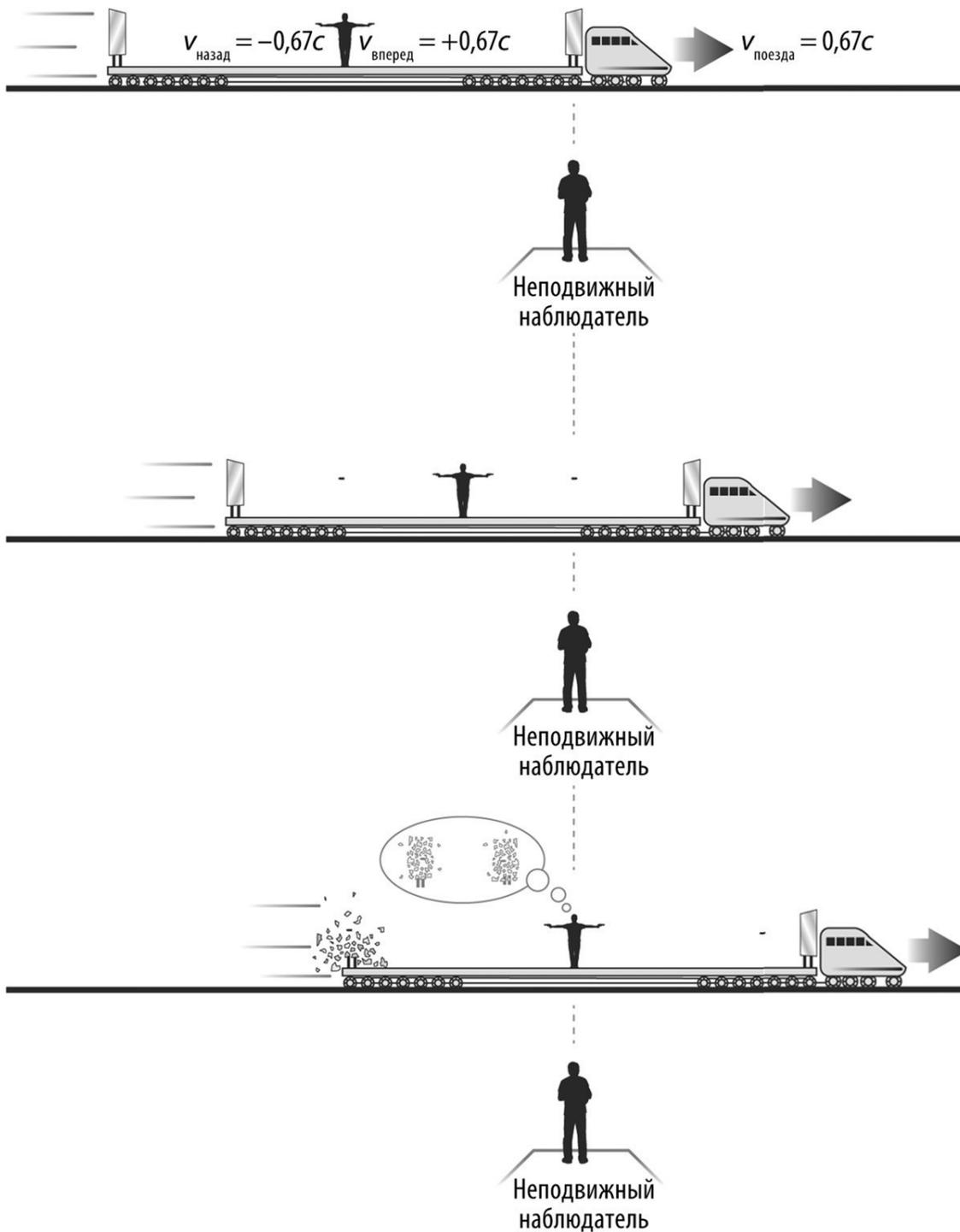


Рис. 9.2. Поезд Эйнштейна. Из специальной теории относительности для высоких скоростей следует, что разные наблюдатели воспринимают пространственные и временные изменения по-разному (поэтому изображать такие эксперименты на схеме довольно сложно). Часы на платформе и в поезде показывают нулевое время ($t = 0$), когда лобовое стекло первого вагона оказывается напротив стоящего на платформе наблюдателя. Когда оба наблюдателя находятся друг напротив друга, наблюдатель в поезде видит, что оба стекла разбиваются одновременно, но для наблюдателя на платформе стекло заднего вагона разбивается, а стекло переднего вагона еще нет.

Поскольку пуле, летящей вперед, придется преодолеть в два раза большее расстояние, чем заднему стеклу, она должна лететь со скоростью намного выше скорости света, однако из

специальной теории относительности следует, что скорость движущейся вперед пули составит примерно 277 000 км/с ($0,92c$)¹⁹⁹. Следовательно, я со своей платформы увижу, что два стекла разобьются не одновременно. Таким образом, для вас эти события произойдут одновременно, но для меня стекло заднего вагона разобьется раньше! И дело тут совершенно не в том, сколько времени нужно зрительным сигналам из разных частей поезда, чтобы достичь ваших или моих глаз²⁰⁰. Дело в том, что этот странный эксперимент демонстрирует наличие двух разных, но в равной степени возможных реальностей: одновременность событий и их порядок могут быть относительными²⁰¹.

ПРОСТРАНСТВО – ВРЕМЯ

Давайте-ка переварим результаты вышеописанного эксперимента. С вашей точки зрения в любой момент времени оба окна одновременно либо целы, либо разбиты. Но для меня существует момент, когда заднее окно уже разбито, а переднее еще нет. Это очень странно. Как может быть, что вы видите два окна разбитыми, тогда как для меня одно из них еще цело? Как будто мы существуем в двух разных вселенных.

Один способ решения этой задачи заключается в опространствлении времени, т. е. во введении понятия «блока вселенной». Если мы принимаем, что все когда-либо произошедшие или еще только предстоящие события постоянно существуют в какой-то точке «блока вселенной» (как постулирует этернализм), относительность одновременности становится не более загадочной, чем возможность или невозможность линеаризации нескольких точек пространства в зависимости от вашего местонахождения. Два телефонных столба кажутся стоящими на прямой, идущей вдоль шоссе, если вы стоите на обочине, но оказываются на поперечной прямой, если вы смотрите на них с середины дороги – это лишь вопрос перспективы. Аналогичным образом оба окна разбиваются одновременно, если они «линеаризованы» в пространственно-временной вселенной с вашей точки зрения, но не с моей. Вот почему специальная теория относительности предоставляет наиболее мощные аргументы в пользу этернализма²⁰².

Интересно, что когда Эйнштейн впервые опубликовал статью о специальной теории относительности, он не утверждал, что время должно рассматриваться в качестве четвертого измерения «блока вселенной». Первым эти удивительные выводы относительно связи пространства и времени сделал его учитель из Цюриха Герман Минковский (который, как говорят, назвал Эйнштейна-студента «ленивой собакой»). В 1908 г., основываясь на своей более ранней работе, Минковский величественно сообщил, что «с этого момента пространство само по себе и время само по себе расплываются в облаках, и лишь их союз сохранится в объективной реальности».

Минковский объединил пространство и время. Он переформулировал теорию Эйнштейна и привел ее к «геометрическому» виду, в котором вселенная имела три пространственных и одно временное измерение. Он считал, что хотя пространство и время относительны, их

¹⁹⁹ Иными словами, в примере с поездом Ньютона скорость пули, летящей по ходу движения состава (400 м/с), складывалась из скорости, сообщаемой пуле в силу инерции движением поезда (200 м/с), и скорости, сообщаемой пуле выстрелом (200 м/с). А в примере с поездом Эйнштейна такое сложение скоростей оказывается невозможным, поскольку результат (400 тыс. км/с) превысил бы скорость света, который, согласно специальной теории относительности, является абсолютным пределом скорости. – *Прим. ред.*

²⁰⁰ В данном примере я поместил обоих наблюдателей на одинаковом расстоянии от начала и конца поезда, чтобы время ожидания сигналов с обеих сторон было одинаковым. Но можно предположить, что вдоль платформы мы разместили ряд синхронизированных часов, которые останавливаются, когда напротив них разбивается стекло. И эти часы покажут, что стекла первого и последнего вагонов разбиваются в разное время.

²⁰¹ Технические и исторические аспекты вопроса об относительности одновременности рассматриваются в работе Brown, 2005.

²⁰² Rietdijk, 1966; Putnam, 1967.

«сплав» абсолютен. Если вы отправитесь в путешествие на космическом корабле, а я останусь на Земле и буду наблюдать за вами отсюда, при вашем возвращении мы разойдемся в оценках длительности и протяженности вашего путешествия, но проделанную вами «дистанцию» в пространстве-времени мы оценим одинаково.

Четырехмерную вселенную Минковского можно упростить, представив ее в виде плоского графика, по горизонтальной оси которого откладывается обобщенная пространственная координата, а по вертикальной – временная. Состояние покоя (без движения) соответствует смещению по вертикальной оси: время идет, но мое положение в пространстве не меняется, тогда как ваш космический полет описывается диагональной линией. Определяя изменение положения по обеим осям, можно рассчитать расстояние, пройденное в системе пространства-времени, и с этим результатом согласятся все наблюдатели. Это расстояние связано с так называемым *собственным временем* – временем, отсчитанным часами на вашем космическом корабле.

Специальная теория относительности называется специальной, поскольку применима к упрощенной вселенной, в которой не учитывается влияние гравитационных сил. После публикации статьи о специальной теории относительности Эйнштейн 10 лет работал над созданием более общей теории. Результатом стала его гениальная *общая теория относительности*, в рамках которой он постулировал эквивалентность гравитационных и инерционных сил.

Законы Ньютона описывают связь между силой тяготения, массой и расстоянием, но теория Эйнштейна позволила глубже постичь *суть* гравитационных сил. Общая теория относительности подводит к удивительному выводу: гравитация – не самостоятельная сила, а результат искривления пространства-времени. Эта теория еще больше укрепила основания идеи Минковского о слиянии пространства и времени в систему пространство-время.

Некоторые утверждают, что общая теория относительности еще в большей степени, чем специальная теория относительности, подтверждает справедливость концепции этернализма, поскольку некоторые решения уравнений общей теории относительности указывают на возможность перемещений во времени. Иными словами, исходя из некоторых предположений и начальных условий, эти уравнения позволяют перенестись вперед и назад по шкале времени.

В этой книге мы не будем подробно говорить об общей теории относительности, тем более что такое обсуждение выходит за рамки моей компетенции. Но, к счастью, для наших целей даже специальная теория относительности обеспечивает важнейшие аргументы в пользу концепций этернализма и «блока вселенной».

Представление об эквивалентности прошлого, настоящего и будущего подрывает наше привычное восприятие реальности, так что если физики и философы отдают предпочтение этернализму над презентизмом, у них должны быть для этого очень веские основания. Назову три из них:

1. Законы физики не дают оснований предполагать, что *сейчас* имеет какой-то более специфический смысл, чем *здесь*, и, следовательно, все моменты времени столь же реальны, как все точки пространства.

2. Специальная теория относительности гласит, что два события, которые один наблюдатель воспринимает как происходящие одновременно, для наблюдателя, находящегося в другой точке пространства, не будут одновременными, и, следовательно, все моменты времени навсегда запечатлены в «блоке вселенной»²⁰³.

²⁰³ Важно отметить, что отсутствие абсолютной одновременности является весомым аргументом в пользу концепции «блока вселенной», но не более того. Реальный урок из специальной теории относительности заключается не в том, что мы живем в «блоке вселенной», а в том, что идея одновременности – лишь пережиток ньютоновского представления об абсолютном времени. Возможно, нет смысла задаваться вопросом, одновременны ли два события, разделенные пространством. Вообще говоря, единственный способ установить одновременность двух разделенных пространством событий заключается в использовании часов, а часы – это всего лишь устройство для наблюдения за ходом времени в ограниченном участке про-

3. Некоторые решения уравнений общей теории относительности указывают на возможность перемещений во времени; следовательно, мы живем в этерналистской вселенной, в которой прошлое и будущее в каком-то смысле «всегда существуют».

Однако, несмотря на все эти убедительные доказательства в пользу этернализма, приходится признать, что законы физики не могут объяснить одно из самых очевидных наблюдений человека, заключающееся в том, что *настоящий момент отличается от всех других моментов, и что время проходит.*

КАК СОВМЕСТИТЬ ФИЗИКУ И НЕЙРОБИОЛОГИЮ ВОСПРИЯТИЯ ВРЕМЕНИ?

Как следует из эпиграфа к данной главе, Эйнштейн придерживался концепции этернализма²⁰⁴, однако ему, по-видимому, тоже не давала покоя кажущаяся особенность настоящего момента.

Рассказывая о беседе с Эйнштейном, философ Рудольф Карнап писал следующее: *«Однажды Эйнштейн заявил, что проблема Настоящего всерьез его беспокоит. Он объяснил, что переживание Настоящего означает для человека что-то особенное, что-то принципиально отличное от прошлого и будущего, но это важное различие не относится и не может относиться к области физики. То, что этот опыт не может объясняться наукой, казалось ему поводом для болезненного, но неизбежного отступления. Я ответил, что все происходящее в объективном мире может быть описано научными методами. С одной стороны, последовательность событий во времени описывается физикой; с другой стороны, особенности человеческого опыта в отношении времени, включая различное отношение к прошлому, настоящему и будущему, могут быть описаны и (теоретически) обоснованы психологией»*²⁰⁵.

Как подметил Карнап, многие физики и философы полагают, что единственный способ совместить идею о вселенной, в которой время не движется, с нашим ощущением течения времени заключается в том, чтобы списать ощущение течения времени на причуды мозга.

На практике физики в большинстве своем игнорируют диссонанс между физикой и нейробиологией времени. Уравнения специфической и общей теории относительности удивительно хорошо согласуются с экспериментальными данными – вне зависимости от того, является ли использующий их ученый этерналистом или презентистом. Тем не менее невозможность согласовать идею «блока вселенной» с ощущением течения времени является весьма глубокой проблемой.

Вот что пишет физик и математик Роджер Пенроуз: *«Мне кажется, существуют серьезные расхождения между нашим осознанным восприятием течения времени и тем, что показывают наши (изумительно точные) теории относительно реальности физического мира. Эти расхождения должны сообщать нам что-то очень важное о физике, что должно бы объяснять наше осознанное восприятие...»*²⁰⁶

А вот что пишет физик и писатель Пол Девис: *«По моему мнению, самая большая проблема кроется в вопиющем расхождении между физическим временем и субъективным (психологическим) временем... Очевидное ощущение движения или течения времени, возможно, приобретенное за счет «черного хода» мышления, является глубочайшей загадкой. Связано ли оно с квантовыми процессами в мозге? Отражает ли оно объективное свойство времени в*

странства.

²⁰⁴ Карл Поппер также пересказывал разговор, в котором Эйнштейн признавал идею «блока вселенной» (Popper, 1992), а Поппер назвал Эйнштейна Парменидом.

²⁰⁵ См. Prigogine and Stengers, 1984, 214.

²⁰⁶ Penrose, 1989, 394.

нашем реальном мире материальных объектов, которое мы просто не можем обнаружить? Или течение времени в конечном итоге окажется исключительно ментальным конструктом – иллюзией или ошибкой сознания?»²⁰⁷

Как нечто столь очевидное, как ход времени, может оказаться иллюзией? Один вариант ответа таков: можно сравнить «блок вселенной» с катушкой киноплёнки, состоящей из ряда статичных кадров. Фильм содержит множество кадров, каждый из которых соответствует какому-то моменту времени, но все они в действительности сосуществуют на катушке. Как в домашнем видео, вы появляетесь на многих кадрах «блока вселенной». И в каждом кадре ваш мозг содержит воспоминания о только что сменившихся кадрах. Было высказано предположение, что такой интегрированный доступ ко многим моментам времени в рамках единственного момента каким-то образом и формирует наше субъективное ощущение течения времени.

Физик-одиночка Джулиан Барбур объясняет это на примере движения зимородка (эту птицу называют королем рыболовов, поскольку она обладает фантастической способностью ловить рыбу): *«Когда в какой-то момент мы думаем, что наблюдаем движение, на самом деле, в этот момент наш мозг содержит информацию о нескольких последовательных позициях объекта, который мы воспринимаем движущимся. Мой мозг в любой момент времени содержит несколько «моментальных снимков». Представляя эти данные сознанию, мой мозг в некотором роде прокручивает для меня кино... Я вижу (в виде нейронных траекторий) шесть или семь мгновенных снимков зимородка в полете, и мне кажется, что я вижу полет. Эта конфигурация мозга, одновременно кодирующая несколько мгновенных снимков, на самом деле, относится лишь к одному...»²⁰⁸*

Как я уже отмечал в главе 1, Барбур наряду еще с несколькими физиками склоняется к некоей крайней версии идеи пространства-времени. Он берет «блок вселенной», разрезает его вдоль оси времени, а затем распределяет срезы по безвременной вселенной, которую называет *Платонией*. Барбур считает, что все возможные моменты, т. е. все мыслимые конфигурации материи, составляющие все моменты времени, существуют как статические «сейчас».

Физик Брайан Грин, сторонник более стандартного этернализма, выдвигает аналогичную идею для совмещения ощущения течения времени и концепции «блока вселенной»: *«Каждый момент в пространстве-времени – каждый срез времени – подобен кадру фильма... и каждый такой момент для вас – настоящий момент, и вы переживаете в нем свои ощущения этого момента. И это всегда будет так. Более того, в каждом отдельном срезе времени ваши мысли и воспоминания достаточно богаты, чтобы у вас возникало ощущение постоянного течения времени. Это чувство, это ощущение течения времени, не требует, чтобы предыдущие моменты («кадры») «последовательно высвечивались»²⁰⁹.*

Нет сомнений, что в каждый момент времени мозг содержит воспоминания о предыдущих моментах. Как мы обсуждали в главе 6, мозг – динамическая система, кодирующая все события в контексте предыдущих событий. Если бы это было не так, мы не могли бы воспринимать речь, поскольку значение каждого слова интерпретируется в контексте предыдущих слов (а иногда, как мы увидим в главе 12, в контексте последующих слов). Но, даже учитывая тот факт, что мозг, находясь в текущем «кадре», имеет доступ к предыдущим «кадрам», мне не кажется, что ощущение течения времени – лишь иллюзия. Вообще говоря, трудно сказать, насколько эта идея о «моментах-в-моментах» для решения парадокса «блок вселенной»/течение времени совместима с данными нейробиологии.

²⁰⁷ Davies, 1995, 283.

²⁰⁸ Barbour, 1999, 267.

²⁰⁹ Greene, 2004.

СОВМЕСТИМА ЛИ ИДЕЯ «БЛОКА ВСЕЛЕННОЙ» С ДАННЫМИ НЕЙРОБИОЛОГИИ?

Мозг – фабрика иллюзий, и большинство нейробиологов и психологов, вероятно, согласятся с тем, что наше субъективное ощущение течения времени является иллюзией. Так что в принципе у нас есть основания для того, чтобы списать ощущение течения времени на выкрутасы разума. Однако проблема в том, что слово «иллюзия» в физике и нейробиологии может означать разные вещи. Когда физик говорит, что течение времени – иллюзия, он предполагает, что это явление происходит только в нашей голове и никак не отражает реалий внешнего мира. А когда нейробиолог утверждает, что наше субъективное ощущение течения времени является иллюзией, он предполагает, что, как всякий субъективный опыт, это ментальный конструкт, но такой конструкт, который, хоть и не достоверно, но отражает физическое явление, *имеющее место* в реальном внешнем мире.

Мозг – продукт эволюции, а успешность эволюции – великолепная проверка способности живого существа воспринимать и использовать законы физики (хотя бы некоторую их часть). Например, зимородок не мог бы так летать, как он летает, если бы его нервная система не использовала законы Ньютона: кроме применения принципов аэродинамики для контроля полета и погружения в воду, зимородок должен уметь предвидеть будущее и согласовывать траекторию движения с траекторией движения рыбы. Кроме того, глаз может не точно передавать положение рыбы в воде из-за отражения света на границе раздела фаз воздух/вода, и некоторые животные умеют компенсировать этот оптический эффект²¹⁰.

НАШЕ ВОСПРИЯТИЕ ЦВЕТА, МУЗЫКИ ИЛИ ЗАПАХА – ЭТО ПРИМЕРЫ СУБЪЕКТИВНЫХ МЕНТАЛЬНЫХ КОНСТРУКТОВ (СВОЙСТВ ЧУВСТВЕННОГО ОПЫТА, ИЛИ КВАЛИА). ЭТО ИЛЛЮЗИИ В ТОМ СМЫСЛЕ, ЧТО ОНИ НЕ СУЩЕСТВУЮТ ВО ВНЕШНЕМ МИРЕ, ОДНАКО ОНИ ИМЕЮТ АДАПТИВНЫЙ СМЫСЛ, ПОСКОЛЬКУ КОРРЕЛИРУЮТ С РЕАЛЬНЫМИ ФИЗИЧЕСКИМИ ЯВЛЕНИЯМИ – ДЛИНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ, СПЕЦИФИЧЕСКИМ НАБОРОМ ЗВУКОВЫХ ВОЛН ИЛИ ХИМИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ МОЛЕКУЛ. В ЭЛЕКТРОМАГНИТНОМ ИЗЛУЧЕНИИ С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 470 НМ НЕТ НИКАКОЙ «СИНЕВЫ», А В МОЛЕКУЛАХ СЕРЫ НЕТ НИЧЕГО ОТ ТУХЛЫХ ПРОДУКТОВ, И РАЗНЫЕ ЛЮДИ И РАЗНЫЕ ЖИВОТНЫЕ МОГУТ ВОСПРИНИМАТЬ ОДИН И ТОТ ЖЕ СИГНАЛ КАК ОТТАЛКИВАЮЩИЙ, НЕЙТРАЛЬНЫЙ ИЛИ ПРИВЛЕКАТЕЛЬНЫЙ.

Суть в том, что нервная система очень хорошо настраивается в соответствии с законами физики. И это касается не только двигательной функции (например, способности гимнастов выполнять двойное сальто с поворотом), но и наших субъективных ментальных ощущений. Наше восприятие цвета, музыки или запаха – это примеры субъективных ментальных конструктов (свойств чувственного опыта, или квалиа). Это иллюзии в том смысле, что они не существуют во внешнем мире, однако они имеют адаптивный смысл, поскольку коррелируют с реальными физическими явлениями – длиной электромагнитной волны, специфическим набором звуковых волн или химической структурой молекул. В электромагнитном излучении с длиной волны 470 нм нет никакой «синевы», а в молекулах серы нет ничего от тухлых продуктов, и разные люди и разные животные могут воспринимать один и тот же сигнал как отталкивающий, нейтральный или привлекательный.

²¹⁰ Schuster et al., 2004.

Чтобы осознать потенциальное адаптационное значение наших субъективных ощущений, давайте вернемся к самой интимной иллюзии, которую мозг навязывает разуму – к *ощущению собственного тела*. Как мы обсуждали в главе 4, если кто-то бьет молотком вам по пальцам, вы испытываете боль. Удивительным образом, хотя ощущение боли возникает в мозге, вы чувствуете ее в другом месте. Она каким-то образом проецируется во внешний мир, в то самое место, где находится кусок плоти, называемый рукой. Мозг настолько преуспел в создании у нас иллюзии владения костями, мышцами и нервами, составляющими наши конечности, что порой переусердствует и сохраняет эту иллюзию даже тогда, когда конечности уже нет. Таким образом, боль можно назвать иллюзией, поскольку это ментальный конструкт. Однако, когда вы испытываете боль, никто и не подумает назвать молоток иллюзией и не заключит, что он не бил вас по пальцу. Таким образом, иллюзия обладания собственным телом имеет под собой реальную основу: существует очень строгая корреляция между внешними событиями (молоток ударяет по пальцу) и субъективным внутренним опытом (ощущение боли). Что лучше убежит наше тело, чем способность мозга *чувствовать* боль: в ощущении собственного тела проявляется теснейшая связь между мозгом и телом, самое сложное из всех мыслимых сопряжений между компьютером и периферическим устройством.

Теперь, когда мы отдаем себе отчет о разных значениях слова Теперь, когда мы отдаем себе отчет о разных значениях слова «иллюзия» и о потенциальной связи между субъективным опытом и физическими явлениями, давайте рассмотрим два аргумента против идеи этернализма о том, что течение времени – это ментальный конструкт физического явления, не существующего в реальности.

ЕСЛИ КТО-ТО БЬЕТ МОЛОТКОМ ВАМ ПО ПАЛЬЦАМ, ВЫ ИСПЫТЫВАЕТЕ БОЛЬ. УДИВИТЕЛЬНЫМ ОБРАЗОМ, ХОТЯ ОЩУЩЕНИЕ БОЛИ ВОЗНИКАЕТ В МОЗГЕ, ВЫ ЧУВСТВУЕТЕ ЕЕ В ДРУГОМ МЕСТЕ. ОНА КАКИМ-ТО ОБРАЗОМ ПРОЕЦИРУЕТСЯ ВО ВНЕШНИЙ МИР, В ТО САМОЕ МЕСТО, ГДЕ НАХОДИТСЯ КУСОК ПЛОТИ, НАЗЫВАЕМЫЙ РУКОЙ. МОЗГ НАСТОЛЬКО ПРЕУСПЕЛ В СОЗДАНИИ У НАС ИЛЛЮЗИИ ВЛАДЕНИЯ КОСТЯМИ, МЫШЦАМИ И НЕРВАМИ, СОСТАВЛЯЮЩИМИ НАШИ КОНЕЧНОСТИ, ЧТО ПОРОЙ ПЕРЕУСЕРДСТВУЕТ И СОХРАНЯЕТ ЭТУ ИЛЛЮЗИЮ ДАЖЕ ТОГДА, КОГДА КОНЕЧНОСТИ УЖЕ НЕТ. ТАКИМ ОБРАЗОМ, БОЛЬ МОЖНО НАЗВАТЬ ИЛЛЮЗИЕЙ, ПОСКОЛЬКУ ЭТО МЕНТАЛЬНЫЙ КОНСТРУКТ.

Эволюция. Если мы живем в презентистской вселенной, в которой время действительно течет, можно придумать множество причин для эволюции субъективного ощущения течения времени. Как наше осознанное восприятие цвета и боли является эволюционной адаптацией, поскольку коррелирует с важными явлениями внешнего мира, наше ощущение течения времени тоже может быть такой адаптацией, поскольку коррелирует с изменениями во внешнем мире. Наше субъективное ощущение течения времени позволяет не только следить за поведением зимородка, но и предвидеть, прокручивать в памяти и воспроизводить все внешние события, разворачивающиеся во времени. Возможно, ощущение течения времени даже играло ключевую роль в развитии способности прогнозировать отдаленное будущее и мысленно путешествовать во времени (глава 11). Но в чем эволюционный смысл такого ощущения, если мы живем в этерналистской вселенной, где в реальности время никуда не течет? Безусловно, не любой биологический признак дает эволюционное преимущество, но большинство все же дают, особенно это касается таких заметных и универсальных признаков, как наше ощущение течения времени. Предположение, что наше субъективное ощущение течения времени является *иллюзией* в самом прямом смысле этого слова, означает, что оно бессмысленно и не имеет

отношения к мощнейшей адаптации, позволяющей мозгу совершать свою главную работу – предвидеть будущее.

Сознание и динамика активности нейронов. Если мы пытаемся разрешить парадокс между идеей «блока вселенной» и ощущением течения времени с помощью гипотезы «моментов-в-моментах», имеет смысл обсудить в этом контексте проблему сознания. Хотя мы не понимаем, как мозг создает сознание, безусловно, траектории активности нейронов играют в этом процессе важнейшую роль. Например, самые очевидные изменения, происходящие при переходе мозга между сознательным состоянием (бодрствованием) и бессознательным состоянием (медленным сном или наркозом), характеризуются изменяющейся во времени картиной активности мозга, в частности, характерными изменениями частоты осцилляций, которая является главной мерой синхронности и динамики активности нейронов. Сон характеризуется медленными осцилляциями, а бодрствование – асинхронной активностью нейронов и быстрыми осцилляциями²¹¹.

В целом, то немногое, что нам известно о природе сознания, говорит о том, что это активный динамический процесс, и обсуждать сознание в рамках идеи «одного кадра» – все равно, что пытаться определить, жив ли кот, по одному застывшему кадру фильма. Дышит ли животное? Бьется ли у него сердце? Участвуют ли молекулы всех его клеток в эволюционном ответе на второе начало термодинамики – в метаболизме? Жизнь – это постоянные метаболические изменения; если метаболизма нет, организм нельзя назвать живым. И чтобы понять, живо животное или нет, недостаточно взглянуть на один застывший кадр, нужно увидеть предыдущий и последующий. Однако жизнь не противоречит идее этернализма, поскольку, чтобы определить, живо ли животное, мы не должны ограничиваться «одним кадром», а можем подождать и увидеть несколько последовательных «кадров»²¹².

Родственная проблема – парадокс Зенона о летящей стреле: можно ли утверждать, что стрела летит, если в каждый момент времени она неподвижна? В каком-то смысле ответ на этот вопрос положительный, поскольку мы можем определить мгновенную скорость стрелы. Но, в отличие от стрелы, сознательные существа должны отдавать себе отчет в том, что «движутся» в этих мгновенных «кадрах». Так что вопрос звучит следующим образом: существует ли сознание в отдельном срезе «блока вселенной», или для проявления сознания требуется некая временная протяженность? Иными словами, существует ли сознание только во времени, и его правильнее сравнивать с музыкой, чем с застывшим кинокадром? Стивен Пинкер подметил эту сложность понимания сознания в рамках статического восприятия: «Материя распространена в пространстве, но сознание существует во времени – и это так же очевидно, как то, что «Я думаю» подразумевает «Я существую»²¹³.

Мы увидим, что сознание не дает ни непрерывного, ни линейного отчета о разворачивающихся вокруг нас событиях. Скорее, оно формируется рывками, и для осознанного восприятия внешних событий требуются сотни миллисекунд. Поэтому остается открытым вопрос, имеет ли смысл говорить о мгновенном сознании, и совместимо ли явление сознания с гипоте-

²¹¹ Panagiotaropoulos et al., 2012; Kandel et al., 2013; Purdon et al., 2013; Baker et al., 2014; Ishizawa et al., 2016.

²¹² Многие физические процессы, такие как жизнь, изменение температуры или движение частицы, представляют собой динамические изменения во времени. Однако важно понимать, что это никак не противоречит концепции этернализма, поскольку этернализм допускает, что на временной шкале пространства-времени происходят изменения! Я считаю, что сознание не вписывается в эту систему, поскольку в соответствии с гипотезой «моментов-в-моментах», высказанной Барбуром и Гринном, мы должны обладать сознанием в рамках единственного «кадра».

²¹³ Вот полная цитата из Пинкера: «Практически невозможно представить, что мы исключим время из нашего сознания и останемся в замершем состоянии, как заклинивший автомобильный гудок, но при этом сохраним разум. Декарт именно в этом видел различие между физическим и идеальным. Материя имеет пространственную протяженность, но сознание существует во времени, и это столь же очевидно, как то, что «Я мыслю» означает «Я существую» (Pinker, 2007).

зой «моментов-в-моментах» для решения парадокса между «блоком вселенной» и ощущением течения времени.

Из законов физики не следует однозначный вывод, что мы живем в четырехмерном «блоке вселенной». Идея «блока вселенной», безусловно, является наиболее удовлетворительной *интерпретацией* специальной и общей теории относительности, однако даже среди физиков не существует единого мнения относительно природы времени. В физике все еще продолжается борьба за создание цельной теории, способной объяснить природу времени. Времени отводятся совершенно разные роли в общей теории относительности и в квантовой механике, вот почему время – камень преткновения в разработке теории квантовой гравитации – попытке совместить общую теорию относительности и квантовую механику. И у нас, понятное дело, нет экспериментальных доказательств одинаковой реальности прошлого, настоящего и будущего.

Вообще говоря, существует совсем немного четких экспериментальных данных, позволяющих различить этернализм и презентизм. Самым очевидным экспериментом было бы перемещение во времени: сама идея перемещений во времени предполагает, что мы существуем в «блоке вселенной»²¹⁴. Уравнения общей и специфической теории относительности не противоречат возможности перемещений во времени, но лишь в весьма экзотических (если не сказать полностью невероятных) условиях. Например, в рамках специальной теории относительности перемещение во времени возможно при скорости коммуникации больше скорости света²¹⁵, а в рамках общей теории относительности оно может реализоваться через кротовые норы, стабилизированные отрицательной энергией. Поэтому на данный момент, даже если законы физики кажутся в большей степени совместимыми с этернализмом, чем с презентизмом, у нас нет прямых экспериментальных доказательств в пользу этой концепции.

Так что перед нами стоит вопрос: следует ли нам адаптировать законы физики (или нашу интерпретацию этих законов), чтобы объяснить осознанное восприятие течения времени, или нейробиология должна найти объяснение нашего субъективного восприятия течения времени? Эту дилемму красочно выразил Брайан Грин: *«Наука не в силах постичь фундаментальное свойство времени, которое человеческий разум воспринимает так же естественно, как легкие поглощают воздух, или же человеческий разум искусственным образом придает времени некое свойство собственного производства, не проявляющееся в законах физики? Если вы зададите мне этот вопрос в рабочее время, я склонюсь ко второй версии, но вечером, когда критическая мысль сползает в рутину обыденной жизни, трудно не согласиться с первой точкой зрения»*²¹⁶.

Поиск ответа на вопрос, является ли течение времени фикцией, созданной мозгом, или каким-то образом отражает реальные законы физики, представляет собой чрезвычайно сложную задачу, находящуюся на стыке физики и нейробиологии. Кроме того, ситуация еще больше усложняется тем, что законы физики и человеческий мозг не независимы друг от друга. Дело не только в том, что механизмы работы мозга подчиняются законам физики, но и в том, что наша интерпретация физических законов связана с функционированием мозга. Мы задаемся вопросом, стоит ли верить мозгу в том, что касается такого очевидного наблюдения, как тече-

²¹⁴ Lockwood, 2005.

²¹⁵ Из уравнений теории относительности следует, что если бы существовали частицы, способные двигаться со скоростью выше скорости света (тахионы), можно было бы посылать сигналы в прошлое и, следовательно, его изменять. Строго говоря, это было бы не *путешествием* во времени, а способом коммуникации между прошлым и будущим.

²¹⁶ Greene, 2004.

ние времени, но не следует ли также задуматься о беспристрастности мозга в интерпретации законов физики?

Как мы увидим далее, человек, по-видимому, развил в себе способность понимать концепцию времени, используя те же механизмы, которые предназначены для постижения пространства. Иными словами, сам мозг создает представление о пространстве-времени. И в этой связи возникает удивительный вопрос: не склоняемся ли мы к той или иной интерпретации законов физики по той причине, что мозг определенным образом интерпретирует время?

10:00

ОПРОСТРАНСТВЛИВАНИЕ ВРЕМЕНИ В НЕЙРОБИОЛОГИИ

Один аспект теории Эйнштейна имел некую аналогию в психологии восприятия времени, по крайней мере, в том, как оно отражается в языке: речь идет о глубокой эквивалентности времени и пространства.
СТИВЕН ПИНКЕР

В 1928 г. Эйнштейн присутствовал на междисциплинарной конференции в Давосе. Одним из участников конференции был маститый швейцарский психолог Жан Пиаже, который революционизировал сферу психологии развития тем, что объяснил механизмы познания детьми таких абстрактных понятий, как количество, пространство и время. По некоторым свидетельствам, упоминая об идеях Пиаже о том, как дети прогрессируют в понимании чисел, пространства и времени, Эйнштейн говорил, что эта теория была «настолько проста, что придумать ее мог только гений».

В книге «Постижение времени ребенком» Пиаже писал: «Эта работа была начата под влиянием нескольких вопросов, заданных Альбертом Эйнштейном более пятнадцати лет назад, когда он председательствовал на первом международном курсе лекций по философии и психологии в Давосе». Один из вопросов звучал так: «Является ли наше интуитивное восприятие времени исходным или производным?» Иными словами, является ли наша концепция времени врожденной или приобретенной? По всей видимости, Эйнштейн задумывался не только о природе времени, но и о том, что мы думаем о времени. А это не менее глубокий вопрос.

ДЕТИ И ВРЕМЯ

Специальная теория относительности Эйнштейна была очень популярна в первые десятилетия XX в. и повлияла на многих ученых, работавших в самых разных областях науки, в том числе, и на Пиаже. Изучая зависимость времени от скорости, Пиаже искал параллели между психологией и физикой: «Я попытаюсь подтвердить гипотезу, что время в психологии зависит от скорости или от движений и их скорости»²¹⁷ (имелась в виду скорость перемещения предметов или самих детей).

Чтобы понять, как время отражается в разуме детей, Пиаже просил их выполнять различные простые задания. В одном таком задании он использовал двух игрушечных змей, которые на протяжении нескольких секунд ползли по параллельным траекториям. Например, синяя и желтая змеи начинали двигаться с одной и той же исходной позиции в один и тот же момент времени и останавливались одновременно, но синяя продвигалась дальше, поскольку ползла быстрее. Дети в возрасте от 5 до 6 лет ошибочно сообщали, что змея, проползшая большее расстояние, останавливалась позже²¹⁸.

Исследования Пиаже и многих других ученых после него показывают, что дети начинают постигать время (или хотя бы правильно отвечать на вопросы о длительности событий) только после постижения концепций пространства и скорости. Например, если детям в возрасте от 5 до 9 лет задавать вопросы об игрушечных поездах, движущихся на разные расстояния с разной скоростью и на протяжении разного времени, правильные ответы с наибольшей вероятностью

²¹⁷ Цитируется по работе Droit-Volet, 2003.

²¹⁸ Piaget, 1946/1969.

будут получены относительно скорости и дальности, но не времени. Даже дети старшего возраста часто допускают ошибки в вопросах о длительности движения. В одном исследовании 42% детей в возрасте от 11 до 12 лет пришли к неправильному заключению, что игрушечный поезд, продвинувшийся дальше, ехал дольше, хотя это было не так²¹⁹.

Одна из причин, почему дети постигают концепцию времени на более поздних этапах развития, заключается в том, что наш способ измерения времени чрезвычайно сложен. Единицы времени сложны и произвольны: месяцы содержат от 28 до 31 дня, в сутках 24 часа, в часе 60 минут, а в минуте 60 секунд (это не метрическая система). Более того, одно и то же время можно выразить разными способами: 8 часов 45 минут и без четверти девять – одно и то же, причем это может быть как утро, так и вечер. И, чтобы еще больше усложнить ситуацию, для определения времени мы используем модульный принцип исчисления: через 30 мин после 8:45 будет не 8:75.

Поскольку терминология времени и всевозможные договоренности по поводу обозначения времени, кажется, были придуманы какими-то злодеями исключительно с целью запутать молодые умы, нет ничего удивительного, что дети с трудом постигают концепцию времени. Интересно, что дети раньше постигают концепцию скорости, чем концепцию времени, хотя мы обычно определяем скорость по отношению к более фундаментальным понятиям пространства и времени. Находясь под влиянием специальной теории относительности, Пиаже, по-видимому, верил в психологическое превосходство скорости над временем. Впрочем, его рассуждения весьма расплывчаты: «Таким образом, релятивистское время – всего лишь расширение (которое имеет место при очень высоких скоростях, в частности, при скорости света) принципа, применяемого на самом простейшем уровне построения физического и психологического времени, который, как мы увидим, лежит в самом основании концепции времени для очень маленьких детей»²²⁰. Таким образом, он предполагал, что дети интуитивно воспринимают относительность времени и его зависимость от скорости.

ПРОСТРАНСТВО, ВРЕМЯ И ЯЗЫК

В главе 1 я писал о том, что животные глубже «понимают» концепцию пространства, чем концепцию времени. Такие простейшие реакции, как доставка еды в чей-то рот или осмотр окрестностей в поисках потенциальной жертвы, требуют умения ориентироваться в пространстве, причем этот процесс намного сложнее, чем ориентировка в одномерном домене времени.

Всем известно, что мыши обучаются выбираться из сложных лабиринтов. А пчелы не только находят дорогу между ульем и цветком, но и сообщают другим пчелам о местонахождении специфических растений. Кроме того, животные получают пространственную информацию, например, о расстояниях, от своих органов чувств гораздо более прямым путем, чем информацию о времени. Например, размер образа змеи на сетчатке содержит информацию о том, насколько эта змея далеко, и, следовательно, позволяет выбрать оптимальный порядок действий. В нервной системе животных эволюционировали сложные способы представления пространственных координат – верх и низ, лево и право; и произошло это до того, как животные развили способность представлять себе временной континуум, состоящий из прошлого, настоящего и будущего.

Такая линия рассуждений соответствует идее о том, что наша способность воспринимать концепцию времени основана на активности сетей нейронов, ранее эволюционировавших для того, чтобы понимать и воспроизводить пространство и ориентироваться в нем²²¹. Специалист

²¹⁹ Siegler and Richards, 1979. См. также Matsuda, 1996.

²²⁰ Piaget, 1946/1969, 279.

²²¹ Walsh, 2003; Núñez and Cooperrider, 2013; Bender and Beller, 2014.

в области психологии познания Рафаэль Нуньес пишет: «За четыре последних десятилетия ученые пришли к выводу, что люди воспринимают концепцию времени, главным образом, в терминах пространства – гораздо более понятного домена»²²².

Часто для подтверждения этой идеи говорят о том, что в рассуждениях о времени мы используем термины, относящиеся к пространству. Филолог Джордж Лакофф и философ Марк Джонсон утверждают, что «опыт времени – тип естественного опыта, который практически полностью воспринимается метафорическим образом (через такие метафоры, как опространствливание как опространствливание ВРЕМЕНИ, или восприятие ВРЕМЕНИ В КАЧЕСТВЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ОБЪЕКТА)»²²³.

Действительно, нам трудно говорить о длительности событий, не прибегая к использованию прилагательных и наречий, относящихся к пространству: *Это была удивительно КОРОТКАЯ реклама. Мы изучаем проблему времени ДЛИТЕЛЬНОЕ время.* Аналогичным образом, мы используем пространственные термины для описания прошлого и будущего: *Забегая ВПЕРЕД, скажу, что едва дождался твоего ответа. Оглядываясь НАЗАД, я понимаю, что это была ужасная идея. Рождество БЛИЗКО к Новому году.*

В ЯЗЫКЕ АЙМАРА, НА КОТОРОМ ГОВОРЯТ НА ЗАПАДЕ БОЛИВИИ И НА СЕВЕРЕ ЧИЛИ, СЛОВО *NAURA* («ПРОШЛОЕ») ТАКЖЕ ОЗНАЧАЕТ «ГЛАЗА» ИЛИ «ВЗГЛЯД», А СЛОВО *QHIRA* («БУДУЩЕЕ») ТАКЖЕ ОЗНАЧАЕТ «СПИНА» ИЛИ «ПОЗАДИ». ТАКИМ ОБРАЗОМ, В ЭТОМ ЯЗЫКЕ ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ ТЕРМИНЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИСПОЛЬЗУЮТСЯ ИНАЧЕ, ЧЕМ У ЕВРОПЕЙЦЕВ. РАФАЭЛЬ НУНЬЕС УКАЗЫВАЕТ, ЧТО ЭТА ОСОБЕННОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ТЕРМИНОВ ДЛЯ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВРЕМЕНИ У ЛЮДЕЙ, ГОВОРЯЩИХ НА ЯЗЫКЕ АЙМАРА, ПОДТВЕРЖДАЕТСЯ ИХ ЖЕСТАМИ. ГОВОРЯ О ПРОШЛОМ, ЭТИ ЛЮДИ УКАЗЫВАЮТ ВПЕРЕД, А, ГОВОРЯ О БУДУЩЕМ, – НАЗАД. ПО-ВИДИМОМУ, ХОД РАССУЖДЕНИЙ ТАКОВ: МЫ ЗНАЕМ ТО, ЧТО ПЕРЕД НАМИ, ПОСКОЛЬКУ ВИДИМ (ВИДЕЛИ) ЭТО СВОИМИ ГЛАЗАМИ – ЭТО ПРОШЛОЕ; А ТО НЕВИДИМОЕ (НЕИЗВЕСТНОЕ), ЧТО СТОИТ ЗА НАМИ, ЭТО БУДУЩЕЕ.

При таком пространственном восприятии времени мы говорим, что прошлое *позади*, а будущее *впереди*. Подобные пространственные метафоры есть во всех языках, однако способы образования метафор могут быть разными. Например, в языке аймара, на котором говорят на западе Боливии и на севере Чили, слово *naura* («прошлое») также означает «глаза» или «взгляд», а слово *qhira* («будущее») также означает «спина» или «позади». Таким образом, в этом языке пространственные термины для определения времени используются иначе, чем у европейцев. Рафаэль Нуньес указывает, что эта особенность применения пространственных терминов для обозначения времени у людей, говорящих на языке аймара, подтверждается их жестами. Говоря о прошлом, эти люди указывают вперед, а, говоря о будущем, – назад²²⁴. По-видимому, ход рассуждений таков: мы знаем то, что перед нами, поскольку видим (видели) это своими глазами – это прошлое; а то невидимое (неизвестное), что стоит за нами, это будущее.

²²² Núñez and Cooperrider, 2013.

²²³ Lakoff and Johnson, 1980/2003.

²²⁴ Núñez and Sweetser, 2006.

СРЕДА

Даже если мы действительно живем в застывшем блоке пространства-времени, в котором время не движется, в нашем субъективном восприятии оно, безусловно, движется. И в языке это движение времени опять-таки отражается с помощью пространственных терминов. *Время ПРОХОДИТ. ПРИБЛИЖАЕТСЯ конец света. Срок ИСТЕК.* Но что именно проходит, приближается или истекает? Это я движусь сквозь время, или я стою и наблюдаю, как река времени течет мимо меня? В филологическом аспекте подходят оба ответа.

Возможно, вам приходилось раздумывать над смыслом фразы типа: *Заседание следующей среды перенесено на два дня.* Что вы делаете в таком случае? Идете на заседание в понедельник или в пятницу? Слово «перенесено» вполне может подразумевать «удалено от нас», т. е. передвинуто вперед. Таким образом, если вы двигаетесь по неподвижной линии времени, и встреча перенесена вперед, следовательно, она назначена на пятницу. Но если вы стоите неподвижно и наблюдаете за течением времени, перенос заседания на два дня означает, что оно произойдет «ближе к вам», т. е. в понедельник. Первый сценарий (пятница) описывается в рамках модели движущегося эго, второй (понедельник) – в рамках модели движущегося времени (рис. 10.1).

Эта двусмысленность – лингвистический эквивалент принципа относительности Галилея: движение должно быть определено по отношению к чему-то. Как мы уже видели, выражение «разность скоростей между вами и львом составляет 10 км/ч» не позволяет понять, кто именно движется. Вообще говоря, в пустом пространстве без ориентиров бессмысленно пытаться определить, кто к кому идет, поскольку движение относительно. Но на практике полезно знать, кто же все-таки двигается – вы или лев. Поэтому лучше пояснить, сказав: «Лев бежит в вашу сторону со скоростью 10 км/ч». При этом подразумевается, что эта скорость определена по отношению к стандарту – неподвижной земле.

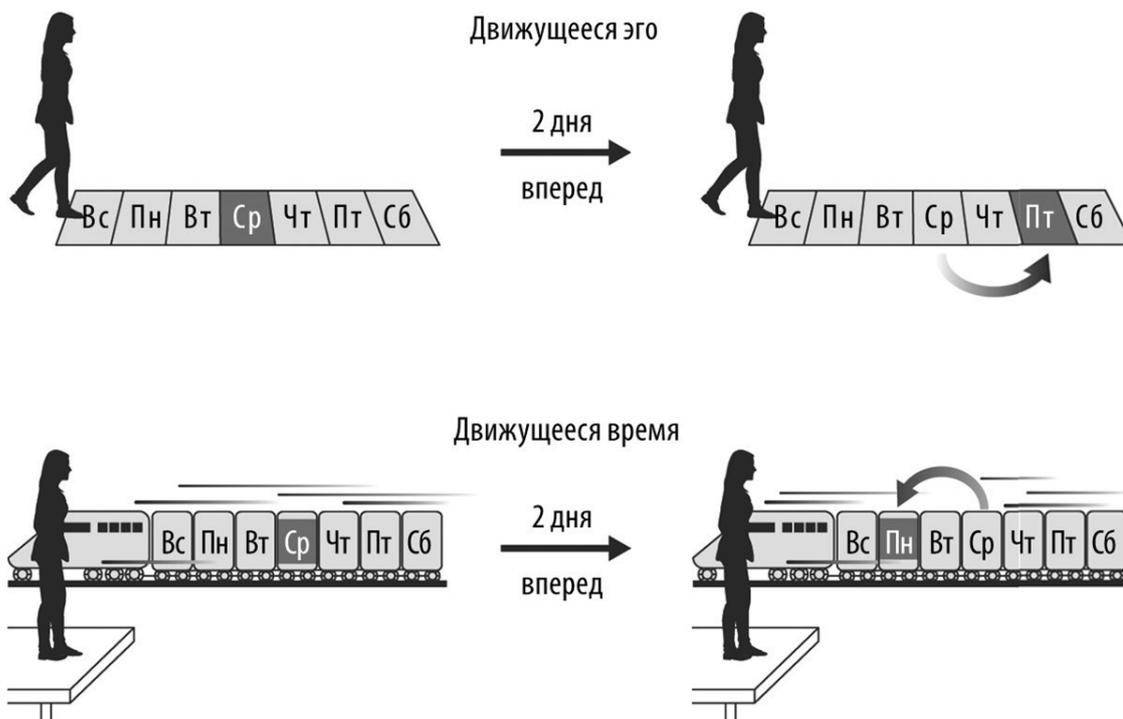


Рис. 10.1. Модели движущегося эго и движущегося времени

Но когда речь идет о движении во времени, такого стандарта не существует. Исследования показывают, что если людей спросить, в какой же день будет проходить заседание, если его передвинут со среды на два дня, голоса делятся примерно в отношении 50:50: половина людей считает, что заседание будет проходить в понедельник, а половина – что в пятницу.

Удивительно, что ответ зависит от недавних передвижений человека. Например, когда такой вопрос задавали людям, приехавшим встречать кого-то в аэропорт, 51% отвечал, что заседание состоится в пятницу, но когда тот же вопрос задавали тем, кто только что прилетел, число голосов «за пятницу» возросло до 76%. Объяснение заключается в том, что путешественники находятся в рамках модели движущегося эго, поскольку они только что совершили значительное перемещение в пространстве.

Другие исследования показывают, что для переключения с одной модели на другую не обязательно предпринимать физическое перемещение: достаточно просто заставить людей подумать о перемещении в пространстве, и это изменяет соотношение ответов²²⁵.

В языке связь между пространством и временем несимметрична. Метафоры из области пространства часто применяются в описании времени, но метафоры из области времени довольно редко встречаются в описании пространства (хотя иногда мы используем единицы времени для определения расстояний: «Я живу в пяти минутах отсюда»). Эта асимметрия – одно из доказательств того, что наше восприятие времени основано на восприятии пространства.

Однако аргументы из области языка сами по себе не могут являться достаточным основанием для подобного вывода. Возможно, мы применяем термины из области пространства для описания времени по причинам более общего свойства: пространство может быть универсальным источником метафор, поскольку это более естественный и более богатый источник.

Вообще говоря, метафоры из области пространства применяются очень широко²²⁶. *Мы стали очень БЛИЗКИ после того, как он ОТДАЛИЛСЯ от своего брата. Укошек очень ВЫСОКИЕ стандарты. Он не ПАДАЕТ духом, напротив, он на ПОДЪЕМЕ.* Впрочем, связь между пространством и временем выходит далеко за рамки языка. Вне зависимости от метафор и особенностей языка, пространство влияет на наше восприятие времени.

КАППА

Представьте себе две лампочки, находящиеся друг от друга на расстоянии нескольких десятков сантиметров. Лампочки загораются по очереди на короткие промежутки времени с интервалом 8 с. Вас просят воспроизвести этот интервал путем нажатия на кнопку на протяжении соответствующего времени. Вопрос такой: *влияет ли расстояние между лампочками на ваше восприятие времени* (точнее, на вашу способность воспроизвести время между вспышками)?

В одном из ранних исследований было обнаружено, что при расстоянии между лампочками 8, 16 и 32 дюйма (дюйм = 2,54 см) среднее время между вспышками оценивалось в 6,5, 7,15 и 8,05 секунд соответственно (тогда как оно всегда составляло 8 секунд)²²⁷. Так что ответ на этот вопрос *положительный*: да, пространство (расстояние между лампочками) влияет на наше восприятие времени.

Этот так называемый *каппа-эффект* был многократно продемонстрирован множеством способов. Например, в рамках другого исследования на экране компьютера вспыхивали три точки: одна слева, другая в центре, третья справа. Вспышки происходили с равными интерва-

²²⁵ McGlone and Harding, 1998; Boroditsky and Ramscar, 2002.

²²⁶ Lakoff and Johnson, 1980/2003.

²²⁷ Price-Williams, 1954.

лами времени: первая точка появлялась в момент времени $t_1 = 0$, вторая – в момент времени $t_2 = 0,5$ с и третья – в момент времени $t_3 = 1$ с. Участников эксперимента спрашивали, был ли первый интервал ($t_2 - t_1$) длиннее или короче второго ($t_3 - t_2$). Хотя интервалы имели равную длительность, на ответы влияло расстояние между точками: люди воспринимали первый интервал более длинным, чем второй, если расстояние между первой (левой) и второй (центральной) точками было больше, чем расстояние между второй и третьей (правой) точками²²⁸.

Каппа-эффект заключается в том, что расстояние между двумя событиями сильно влияет на восприятие людьми временного интервала между ними. Эта связь между пространством и временем в нашем мозге дополнительно подтверждается в обратной ситуации. Увеличение интервала времени между двумя вспышками, происходящими на одном и том же расстоянии друг от друга, приводит к тому, что люди в своих оценках увеличивают расстояние между ними (так называемый *tau-эффект*).

Хотя наличие каппа и тау-эффектов говорит о наличии симметрии в отношении между пространством и временем, другие эксперименты показывают обратное. Из исследований когнитивного психолога Леры Бородицкой вытекает, что расстояние сильнее влияет на оценку длительности сигнала, чем длительность сигнала влияет на оценку расстояния. Бородицкая и ее коллега Дэниель Касасанто просили студентов Массачусетского технологического института разглядывать на экране компьютера медленно удлиняющиеся линии. Линии вырастали на разную длину на протяжении отрезка времени от 1 до 5 секунд. После наблюдения за каждой линией участников эксперимента просили оценить время высвечивания линии на экране *или* ее конечную длину.

Результаты эксперимента вновь показали, что при одинаковой длительности сигнала оценка длительности зависела от расстояния, на которое увеличивалась линия. Если линия, находившаяся на экране 3 с, сильно удлинялась, люди правильно оценивали длительность сигнала в 3 с, но если она увеличивалась лишь немного, оценка длительности была ближе к 2,7 с²²⁹. Напротив, длительность зрительного сигнала почти не влияла на оценку длины линии. Бородицкая иронически прокомментировала эти наблюдения: «Пиаже пришел к выводу, что дети не могут однозначно различать пространственные и временные составляющие событий до достижения девятилетнего возраста. Как и многие современные исследования в области познания, наши данные показывают, что Пиаже правильно описывал наблюдаемые явления, но ошибался в определении возраста, в котором дети начинают справляться с этой проблемой: по-видимому, студенты МТИ тоже не могут отделить пространственный компонент события от временного».

ЧАСЫ ИЛИ ПАМЯТЬ?

Счетчик пробега и часы на приборной доске автомобиля не связаны между собой. Едете ли вы со скоростью 100 км/ч или застряли в пробке в Лос-Анджелесе и ползете со скоростью 10 км/ч, часы покажут, когда пройдет час (мы, естественно, игнорируем минимальное влияние эффектов специальной теории относительности). Напротив, наличие каппа-эффекта показывает, что часы внутри головного мозга, отсчитывающие время в секундном диапазоне, каким-то образом подвержены влиянию мозгового «счетчика пробега» – цепей нейронов, ответственных за оценку расстояний. Однако мы не можем однозначно утверждать, что часы в мозге уско-

²²⁸ Huang and Jones, 1982. Эффекты каппа и тау были продемонстрированы во многих исследованиях как в соматосенсорной, так и в визуальной модальности (Helson and King, 1931; Cohen et al., 1953; Sarrazin et al., 2004; Goldreich, 2007; Grondin et al., 2011).

²²⁹ Casasanto and Boroditsky, 2008. Похожее исследование, в котором также подтверждается асимметрия влияния расстояния на оценку времени и наоборот: Coull et al., 2015.

ряются из-за каппа-эффекта: как мы уже обсуждали в предыдущих главах, причиной иллюзий, связанных со временем, могут быть еще и искажения памяти.

В рамках экспериментов по изучению восприятия времени участники часто просят оценивать специфический интервал времени и запоминать этот интервал, чтобы сравнивать с другими. Для решения первой описанной выше задачи (где две лампочки зажигались на разном расстоянии друг от друга с интервалом в 8 с) человек использует находящийся у него в голове хронометр, который отмеряет и запоминает интервал времени, а затем вновь использует хронометр, чтобы воспроизвести воспоминание. Таким образом, каппа-эффект, возможно, возникает не из-за того, что изменение расстояния влияет на скорость часов как таковую, а из-за того, что изменение расстояния влияет на сохранение или воспроизведение воспоминания о длительности интервала.

Согласно одной гипотезе, в мозге существует единая многоцелевая система обработки информации, касающейся величины самых разных параметров²³⁰. Конкретнее, в теменной коре расположены сети нейронов, задача которых состоит в обработке количественной информации – вне зависимости от того, относится ли эта информация к пространственным, временным или численным данным. Поэтому возможно, что нарушение восприятия времени при изменении расстояний является результатом изменения процесса запоминания количественной информации в этих сетях нейронов.

Например, при запоминании небольших интервалов времени и больших расстояний может происходить увеличение образов интервалов времени. Это вариант *регрессии к среднему*: при одновременном запоминании двух количественных параметров происходит в некотором смысле частичный обмен свойствами. В соответствии с гипотезой многоцелевой системы обработки количественной информации на оценку длительности визуального сигнала влияет не только расстояние, но также его яркость или размер. Как уже упоминалось выше, если на экране на протяжении одного и того же времени высвечивается небольшое число (скажем, 1) или большое число (скажем, 9), люди склонны считать, что большое число находилось на экране чуть дольше²³¹.

Существование области мозга, ответственной за обработку как пространственных, так и временных данных, заложено в основу концепции ментальной линии времени – ментального эквивалента оси времени в декартовых координатах. Те из нас, кому повезло получить формальное образование, часто представляют себе время как линию, состоящую из короткого отрезка слева (прошлое) и более длинного отрезка справа (будущее). Эту ментальную линию времени и ее связь с пространством выявляют по многим проявлениям, включая так называемый эффект *STEARC* (*Spatial-Temporal Association of Response Codes*).

Представьте себе, что вы слушаете последовательность многих нот разной длительности, и после каждой ноты вы сравниваете ее длительность с неким стандартным значением путем нажатия на одну из двух кнопок (длиннее или короче). Удивительное дело, но эффективность решения этой задачи зависит от расположения кнопок! Люди быстрее и лучше справляются с задачей, если для обозначения короткого интервала могут воспользоваться указательным пальцем левой руки, а для обозначения длинного интервала – указательным пальцем правой руки, но не наоборот (когда кнопка короткого сигнала справа, а длинного слева). Другими словами, для человека более естественно реагировать на короткий сигнал левой рукой, а на длинный – правой рукой, как будто в цепях нейронов ментальная линия времени направлена слева направо²³².

²³⁰ Walsh, 2003; Buetti and Walsh, 2009.

²³¹ Xuan et al., 2007; Hayashi et al., 2013; Cai and Wang, 2014.

²³² Ishihara et al., 2008; Kiesel and Vierck, 2009.

Дополнительные подтверждения существования ментальной линии времени опять-таки обнаружены в лаборатории Леры Бородицкой. Люди, пережившие инсульт с поражением правой части теменной зоны коры, часто недостаточно отчетливо воспринимают предметы, находящиеся слева от них (так называемое левостороннее игнорирование полупространства). Например, такие пациенты не берут еду с левой части тарелки или даже не умывают левую сторону лица. Бородицкая и ее коллеги доказали, что пациенты с левосторонним игнорированием полупространства затрудняются разместить информацию о прошлом и будущем на ментальной линии времени, что приводит к неспособности вспомнить временной контекст событий²³³.

Более того, некоторые данные указывают на глубокую связь пространства и времени на уровне отдельных нейронов²³⁴. Например, как было сказано выше, нейробиологи на протяжении многих десятилетий анализировали активность нейронов, ответственных за восприятие пространства. В частности, они изучали активность клеток места в гиппокампе, которые с большей вероятностью возбуждаются в тот момент, когда животное попадает в специфическую точку пространства. Более поздние исследования показали, что небольшая часть клеток гиппокампа может запоминать расстояние, проделанное крысой на беговом колесе. Например, такой «нейрон расстояния» может возбуждаться в тот момент, когда крыса проделала путь в пять метров, причем более или менее независимо от общей длины пути (или, что одно и то же, независимо от скорости вращения колеса). Другие клетки, по-видимому, запоминают количество времени, проведенного животным на колесе, например, возбуждаясь через 20 секунд пробежки, и опять-таки более или менее независимо от общей длины проделанного пути. Однако большинство клеток ведут себя более сложным образом: характер их возбуждения зависит от некоего сложного комплекса факторов, включающих в себя положение в пространстве, проделанное расстояние, время и скорость движения.

В целом мы пока не понимаем до конца, как нейроны гиппокампа (или какой-то другой области мозга) измеряют, воспроизводят и хранят информацию о величине пространственных и временных параметров. Но на основании филологических, психофизических и нейрофизиологических данных можно сделать вывод, что в наших цепях нейронов пространство и время переплетены между собой.

ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В ФИЗИКЕ И НЕЙРОБИОЛОГИИ

В последних главах мы говорили о том, что связь между пространством и временем имеет интересные аналогии в физике и нейробиологии. Перечислим их.

Время относительно. Эйнштейн показал, что, хотя скорость света абсолютна, время и пространство относительны: при высоких скоростях ход часов замедляется. Эйнштейн также упоминал об относительности субъективно воспринимаемого времени: «Час, проведенный в парке на скамейке с симпатичной девушкой, кажется минутой, тогда как минута на горячей плите может показаться часом»²³⁵. Как мы обсуждали в главе 4, наше субъективное ощущение течения времени действительно относительно и зависит от множества факторов, включая обстановку, эмоциональное состояние, сосредоточенность, особенности стимулов (такие как расстояние и скорость), а также воздействие психоактивных веществ.

Пространство и время не независимы. Специальная теория относительности устанавливает связь между пространством и временем: перемещение с очень высокой скоростью через пространство замедляет время, тогда как неподвижность – самый «быстрый» путь перемещения вдоль оси времени. В субъективном восприятии пространство и время тоже взаимосвя-

²³³ Saj et al., 2014.

²³⁴ Pastalkova et al., 2008; Kraus et al., 2013; Genovesio and Tsujimoto, 2014.

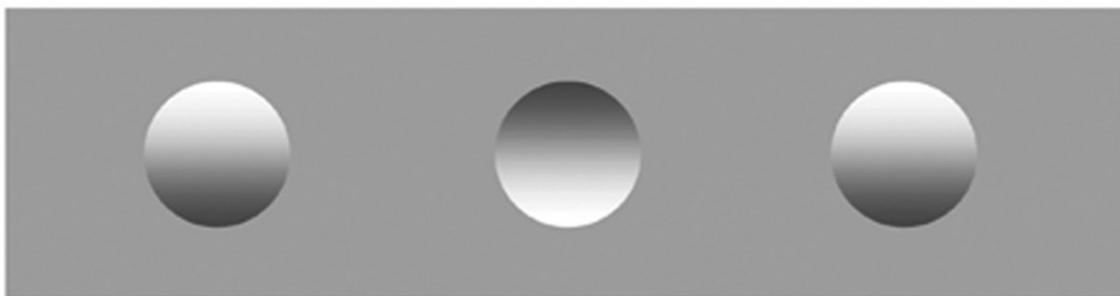
²³⁵ См. Calaprice, 2005.

заны. Например, эта связь проявляется в форме каппа-эффекта, который заключается в том, что при увеличении расстояния между двумя событиями, происходящими с одним и тем же интервалом времени (что аналогично увеличению скорости), люди склонны преувеличивать длительность этих интервалов²³⁶.

Относительность одновременности. Одно из наиболее удивительных следствий специальной теории относительности заключается в том, что два одновременных события с точки зрения одного наблюдателя не являются одновременными для другого наблюдателя, движущегося по отношению к первому, а, значит, одновременность относительна. Например, поскольку скорость света в миллион раз больше скорости звука, зрительные и слуховые сигналы от одного и того же события поступают к нашим органам чувств с разной задержкой. На дешевых местах в концертном зале вы слышите звук и видите удар тарелок как бы одновременно, однако звук может доходить до вас с задержкой до 100 мс. В главе 12 мы узнаем, что при создании динамической картины внешних событий мозг достаточно вольно интерпретирует одновременность событий.

Пиаже очень занимали эти параллели из мира физики и психологии. По-видимому, он верил в существование глубокой связи между детским врожденным представлением об относительности времени и относительностью времени в теории Эйнштейна²³⁷. Но любая кажущаяся параллель между специальной теорией относительности и нашим восприятием времени – лишь кажущаяся параллель. Взаимозависимость пространства и времени в физике раскрывает перед нами законы вселенной, но не позволяет глубже постичь психологию восприятия времени. Тот факт, что расстояние может влиять на восприятие времени, ничего не говорит о физической природе пространства и времени, однако вскрывает некие глубинные механизмы функционирования мозга²³⁸. Но какие именно?

На этот вопрос существует несколько ответов. Один из них заключается в том, что от нашего первого до нашего последнего вздоха мозг статистически обрабатывает все, что мы видим, слышим и испытываем каким-либо образом, и использует все обнаруженные им закономерности для объяснения внешнего мира. Рассмотрите изображение на рис. 10.2.



²³⁶ Как было сказано, каппа-эффект имеет параллели в специальной теории относительности: если в условиях каппа-эксперимента человек наблюдает за быстро движущимся объектом в другой системе координат, часы наблюдателя идут быстрее, т. е. для него эксперимент занимает больше времени, как для находящегося в покое наблюдателя из парадокса с близнецами (Goldreich, 2007). Однако в специальной теории относительности существует некий компромисс между расстоянием и временем. В локальном плане скорость и затраченное время связаны между собой обратной зависимостью, однако в условиях каппа-эффекта воспринимаемая длительность процесса и скорость пропорциональны друг другу.

²³⁷ Например, Пиаже утверждал следующее: «Как ни парадоксально, относительная длительность событий и собственное время в теории Эйнштейна связаны с абсолютным временем таким же образом, как абсолютное время связано с индивидуальным и локальным временем в понимании ребенка» (цитируется в соответствии с Sauer, 2014). «В макроскопической вселенной, однако, время находится в подчиненном положении по отношению к скорости, поскольку при высоких скоростях концепция релятивистского времени сталкивается с такими же трудностями, как представления о времени у маленького ребенка, и также предполагает подчиненное положение временных связей по отношению к некоторым скоростям». (Piaget, 1972).

²³⁸ Заметьте, пожалуйста, что это совсем не то же самое, что я говорил в предыдущей главе в отношении субъективного ощущения течения времени. Вне зависимости от искажений, вносимых мирадами временных иллюзий, наше субъективное ощущение течения времени требует объяснения в рамках как физики, так и нейробиологии.

Рис. 10.2. Иллюзия вогнуто-выпуклых фигур. Центральный круг с темным нижним краем кажется нам выпуклым (выступающим над плоскостью страницы), а круги с темным верхним краем кажутся вогнутыми, поскольку мозг считает, что свет поступает сверху

Средний из трех кругов на рисунке кажется нам выпуклым (как бы выступающим над плоскостью страницы), тогда как два других выглядят вогнутыми (как бы вдавленными в страницу; а если вы перевернете страницу вверх ногами, все окажется наоборот: центральный круг будет вогнутым, а два других выпуклыми). Эта иллюзия возникает из-за того, что с самого момента рождения человека система восприятия зрительных образов собирает статистику и устанавливает, что свет обычно идет сверху, так что бугор на стене затенен снизу, а впадина – сверху.

Подобно тому, как мозг использует накопленные данные об источниках света для определения формы предметов, он использует предыдущий опыт для анализа пространственных и временных образов.

Все мы имеем богатый опыт наблюдений за предметами и живыми существами, движущимися в пространстве и во времени, но обычно в весьма ограниченном диапазоне скоростей. И мы знаем, что время и расстояние коррелируют друг с другом: ребенок, наблюдающий за сползанием дождевой капли по стеклу, понимает, что с течением времени капля проделывает все большее и большее расстояние.

Часы мозга далеки от совершенства, и поэтому мозг основывает свои суждения на предыдущем опыте. Вообще говоря, такая не относящаяся к делу информация, как расстояние между источниками света при определении длительности вспышки, достаточно слабо влияет на наше восприятие – в пределах точности часов мозга. Все это означает, что если у вас в мозге неточный хронометр, а вам нужно определить время движения двух игрушечных поездов, имеет смысл учесть расстояние, проделанное каждым поездом²³⁹.

Мне кажется, существуют как минимум две причины, почему время и пространство взаимосвязаны в сетях нейронов. Во-первых, как и сама эволюция, мозг имеет весьма гибкий *modus operandi*²⁴⁰: он всегда заимствует и применяет уже существующие решения. Вполне вероятно, что наша способность понимать концепцию времени отчасти появилась благодаря использованию сетей нейронов, предназначенных для восприятия пространства. Во-вторых, мозг мастерски впитывает информацию из образов внешнего мира, а поскольку пространственные и временные интервалы во внешнем мире строго коррелируют между собой, мозг оценивает расстояние для оптимизации оценки времени.

В рамках теории этернализма время «опространствливается»: все моменты времени зафиксированы в «блоке вселенной», в результате чего мы делаем вывод, что течение времени – созданная мозгом иллюзия. Но не может ли эта иллюзия создаваться другим способом? Не может ли быть, что строение нашего мозга влияет на интерпретацию законов физики?

Физик Ли Смолин считает, что последовательное опространствливание времени в физике изменило наше понимание природы времени: «Способность замораживать время... оказалась большим подспорьем для науки, поскольку нам не нужно наблюдать за движением в реальном времени... Но, кроме пользы, это изобретение имеет глубокие философские послед-

²³⁹ Общая стратегия использования прошлого опыта и лучших оценок современной ситуации описывается байесовской оценкой решений (Kording, 2007). Считается, что она применяется во многих аспектах восприятия и принятия решений, включая оценку длительности событий (Collyer, 1976; Goldreich, 2007; Jazayeri and Shadlen, 2010).

²⁴⁰ Образ действия (*лат.*) – Прим. ред.

ствия, поскольку поддерживает идею, что время – это иллюзия. Метод заморозки времени работает настолько хорошо, что большинство физиков даже не подозревают, какую шутку это сыграло с нашим пониманием природы»²⁴¹.

Теперь, когда нам известно, что сам мозг тоже занимается опространствливанием времени, уместно задать вопрос, выигрывает ли теория этернализма от того, что согласуется со строением органа, ответственного за выбор между этернализмом и презентизмом²⁴².

Другими словами, поскольку мы разработали теории и математические модели для представления времени в виде еще одной пространственной координаты, может быть, нам легче принять этернализм, чем презентизм, поскольку мозг воспринимает время именно в рамках этернализма?

Трудно однозначно ответить на этот вопрос, но, как мы видим, человеческий разум и в самом деле существует в рамках этернализма: в наших мыслях прошлое и будущее не просто существуют, но являются возможными направлениями для перемещения. Вообще говоря, отличительная особенность нашего вида заключается в осуществлении постоянных мысленных переходов между прошлым, настоящим и будущим.

²⁴¹ Smolin, 2013.

²⁴² В данном случае речь идет не о том, что интуитивно нам ближе презентизм, поскольку только настоящее кажется нам реальным. Здесь речь идет о том, что с учетом абстрактного и математического представления времени в качестве одного из измерений (аналогичного пространству) мы все больше склоняемся к этернализму, поскольку начинаем воспринимать время в терминах пространства.

11:00

МЫСЛЕННЫЕ ПУТЕШЕСТВИЯ ВО ВРЕМЕНИ

Бессмертие банально; кроме человека, все живые существа бессмертны, ибо не знают о смерти.

ХОРХЕ ЛУИС БОРХЕС

11 марта 2011 г. землетрясение силой 9 баллов вызвало мощное цунами, накрывшее северо-восточное побережье Японии. В результате катастрофы погибло около 15 000 человек, и сотни тысяч остались без крова. В процессе разбора завалов было обнаружено множество «каменной цунами» – крупных каменных плит, на которых столетия назад была выбита надпись «Не строить дома ниже этой отметки!»²⁴³ Где-то эти предупреждения соблюдали, где-то игнорировали, хотя те, кто делал эти надписи, совершенно очевидно, думали об отдаленном будущем, представляя себе, что однажды такие же люди, как они сами, будут раздумывать над тем, где строить дома. Те, кто делал эти надписи, заглядывали в будущее и давали совет потомкам, исходя из своего трагического опыта.

Психологи Томас Саддендорф и Майкл Корболлис называют нашу способность мысленно переноситься в будущее *мысленным перемещением во времени*²⁴⁴. Как обсуждалось в главе 2, наша способность превращать камень в орудие труда, сеять семена для получения пищи, строить хижины, работать за зарплату или копить на пенсию связана с умением предвидеть разные сценарии будущего и понимать, что наши действия в настоящем определяют наше будущее.

Способность мысленно переноситься в будущее, говоря словами психолога Энделя Тульвинга, «привела к радикальному сдвигу в отношении человека к природе. Вместо того чтобы использовать разум для сопротивления капризам природы, включая неопределенность в отношении пищи, убежища и защиты от хищных зверей, человек начал предвидеть возникновение этих проблем и предпринимать шаги для ликвидации этой неопределенности»²⁴⁵.

Многие психологи, включая Тульвинга и Саддендорфа, считают, что мысленное перемещение в будущее является исключительной прерогативой человека, и что, вообще говоря, эта способность – неотъемлемый признак человеческого существа.

ВОСПОМИНАНИЕ И ПРЕДВИДЕНИЕ

Я помню, как ребенком гулял по берегу озера в парке Роджера Уильямса²⁴⁶. Была зима, и местами вода в озере была покрыта льдом. По глупости я попробовал прочность льда и провалился в ледяную воду. Моя способность вспомнить и мысленно пережить это событие основана на двух типах памяти: семантической и эпизодической. Различие между этими двумя вариантами человеческой памяти иногда объясняют, как различие между знанием и запоминанием.

Семантическая память относится к знаниям, таким как название парка и его местонахождение в городе Провиденс, который, в свою очередь, находится в штате Род-Айленд. Кроме того, семантическая память включает в себя знания более общего рода, необходимые для пони-

²⁴³ <http://www.nytimes.com/2011/04/21/world/asia/21stones.html> (5/15/2015).

²⁴⁴ Suddendorf and Corballis, 1997, 2007.

²⁴⁵ Tulving, 2005.

²⁴⁶ Парк в городе Провиденс, названный в честь основателя города, английского протестантского теолога Роджера Уильямса. – *Прим. перев.*

мания рассказанной мной истории, как то, что вода превращается в лед, и что ледяная вода очень холодная.

Эпизодическая память относится к моей способности мысленно пережить этот случай: увидеть мысленным взором лед, возратить эмоциональное переживание от ощущения холодной воды и вспомнить, что там было мелко, и я легко выбрался на берег.

Одно различие между семантической и эпизодической памятью, о котором часто забывают, заключается в отсутствии или наличии временных отметок. Все знают, что вода превращается в лед, но я готов биться об заклад, что никто из вас не помнит, когда узнал эту важную информацию. Возможно, вы знаете название столицы Непала, но знаете ли вы, когда узнали, что это Катманду?

Наша семантическая память хранит информацию о мире, но не хранит дату, когда был получен тот или иной фрагмент информации, или даже порядок получения разных фрагментов информации. Что вы узнали раньше: *что пикули – это огурцы, или что изюм – это виноград?*

Напротив, эпизодическая память, как файлы в вашем компьютере, обычно хранит временную пометку – не обязательно точную дату, но приблизительно год, ваш приблизительный возраст или просто тот факт, что этот эпизод произошел до или после другого важного события в вашей жизни. Например, если вы помните первый поцелуй и самый неприятный случай из своей жизни, вероятно, вы знаете, что было раньше, а что потом (надеюсь, это были два разных события).

Эпизодическая память и наша способность мысленно проецировать себя в будущее очень сильно зависят от семантической памяти. Было бы трудно представить себе будущие каникулы на тропическом пляже, ничего не зная о песке, солнце, океане и коктейле Пина колада.

Как показывают исследования – и это вполне соответствует идее о том, что семантическая память может служить основой для накопления эпизодических воспоминаний – у детей семантическая память развивается раньше эпизодической. Например, когда четырехлетние дети узнают названия новых цветов, таких как салатный или маренго, они быстро обучаются применять новые знания и подбирают картинки соответствующего цвета. Но если их спросить, *когда* они выучили названия этих цветов, они часто заявляют, что знали их всегда, хотя впервые услышали о них лишь несколько минут назад²⁴⁷.

Люди с так называемой *антероградной амнезией*²⁴⁸ обычно теряют способность накапливать новые семантические и эпизодические воспоминания, хотя по-прежнему обучаются новым двигательным навыкам, например, езде на велосипеде, и используют так называемую *процедурную* (или имплицитную) память. Прежде накопленные семантические воспоминания (например, имена членов семьи или название столицы Франции) в целом сохраняются, однако у некоторых пациентов с амнезией также снижается способность вспоминать старые эпизоды из жизни (которые произошли до начала болезни)²⁴⁹.

Не удивительно, что человек, страдающий амнезией, с трудом вспоминает, что он делал вчера – в этом, собственно, и заключается суть амнезии. Но возникают ли у таких людей проблемы с планированием будущего или описанием того, чем они могли бы заниматься завтра?

По-видимому, ответ на этот вопрос *положительный*. За последние два десятилетия постепенно выяснилось, что некоторые пациенты с амнезией с трудом представляют себя как в прошлом, так и в будущем. У одного такого пациента (назовем его инициалами К. С.) в результате аварии на мотоцикле оказался поврежден гиппокамп. У него почти полностью нарушился механизм эпизодической памяти, но, кроме того, он и о будущем рассуждал с большим трудом.

²⁴⁷ Taylor et al., 1994.

²⁴⁸ Антероградная амнезия – нарушение памяти о событиях, произошедших после травмы или начала заболевания. – Прим. ред.

²⁴⁹ Hassabis et al., 2007; Race et al., 2011; Kwan et al., 2012.

Ниже представлен фрагмент беседы между пациентом К. С. и Энделем Тульвингом.

«Э.Т.: Давайте попытаемся еще раз поговорить о будущем. Что вы собираетесь делать завтра?

[15 секунд молчания]

К. С.: Я не знаю.

Э. Т.: Вы помните мой вопрос?

К. С.: О том, что я буду делать завтра?

Э. Т.: Да. Как бы вы описали состояние своего разума, когда вы пытаетесь думать на эту тему?

[5 секунд молчания]

К. С.: Пустота»²⁵⁰.

Очевидно, что К. С. понимал концепцию прошлого, настоящего и будущего. Он мог выстраивать события в порядке очередности и знал, что у него умер брат. По-видимому, К. С. потерял способность осуществлять то, что Саддендорф и Корболлис назвали бы мысленным перемещением во времени.

Подобные наблюдения согласуются с идеей, что мысленные перемещения назад и вперед во времени отчасти основаны на тех же когнитивных возможностях, которые мы используем для хранения и воспроизведения автобиографической информации о прошлом.

МЫСЛЕННЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ ВО ВРЕМЕНИ У ЖИВОТНЫХ

Является ли умение мысленно представлять себя в прошлом или в будущем уникальным свойством *Homo sapiens*? Мы видели, что животные могут определять время и естественным образом предвидят внешние события: они выделяют слюну, когда звенит колокольчик, возвещающий об обеде, и могут просыпаться до рассвета, чтобы заняться поиском пищи. Некоторые животные даже подготавливают свое будущее: птицы вьют гнезда, бобры строят плотины, чтобы защитить хатки, а белки запасают орехи. Но означают ли эти поведенческие реакции, что животные в каком-то смысле думают о будущем или понимают концепцию времени?

Определять время – совсем не то же самое, что думать о будущем: часы сообщают время, но не понимают его природу. Более того, строительство гнезд или заготовление пищи не обязательно означают, что животные понимают долгосрочные последствия своих действий. Никому в голову не придет предположить, что, когда гусеница ищет подходящее убежище, чтобы прикрепиться и превратиться в куколку, она думает про себя: «Вот отличное местечко, где я смогу превратиться в прекрасную бабочку». Большинство примеров такого долгосрочного планирования на поверку оказываются врожденными инстинктами.

Психолог Дэниель Гилберт заметил: «Белка, прячущая орех в моем саду, «знает» о будущем столько же, сколько падающий камень «знает» о законе тяготения»²⁵¹. Действительно, орехи запасают даже молодые белки, никогда не видевшие зимы. Животные совершают какие-то действия, не понимая, почему они это делают, и каковы долгосрочные последствия этих действий. Известно, что когда-то и древние люди совершали достаточно сложные телодвижения, не задумываясь о том, что произойдет через 9 месяцев.

Однако тот факт, что многие поведенческие реакции животных являются врожденными, не означает, что животные *не могут* мысленно перемещаться во времени. Вопрос о том, способны они на это или нет, горячо обсуждается специалистами в области зоопсихологии и эво-

²⁵⁰ Tulving, 1985.

²⁵¹ Gilbert, 2007.

люционной психологии. В частности, подобная способность, возможно, имеется у представителей семейства вороновых (ворон, воронов и соек).

Британский психолог Никола Клейтон долгое время пыталась установить, могут ли голубые сойки мысленно переноситься в будущее. Голубые сойки прячут кусочки пищи в самых разных местах и позднее отыскивают их, благодаря великолепной пространственной памяти. Как мы уже отмечали, само по себе такое поведение не предполагает мысленного перемещения во времени. Однако с помощью некоторых хитроумных манипуляций Клейтон показала, что птицы не просто следуют инстинкту прятать пищу. Голубые сойки питаются червями (гусеницами мотыльков) и орехами, но предпочитают червей, причем свежих. Например, когда у них есть выбор между живым червяком и орехом, они возьмут червяка, но если им показать орех и червяка, умершего пять дней назад, они поколеблются и выберут орех.

Возникает вопрос: что будет делать сойка, если у нее есть возможность спрятать свежего червя и орех, но вернуться к тайнику она сможет *либо* через четыре часа, *либо* через пять дней? Так вот, после четырехчасового перерыва птицы отправляются за червями, но если им позволяют вернуться только через пять дней, они чаще летят туда, где спрятали орехи (чтобы исключить возможность того, что птицы ориентировались по запаху лакомства, исследователи всегда выкрадывали спрятанную еду до возвращения птиц). При возвращении через четыре часа 83% птиц направлялись туда, где спрятали червей, тогда как через пять дней за червями отправлялось 0% птиц. По-видимому, птицы понимали, что за пять дней срок годности червей уже истек.

ПСИХОЛОГ ДЭНИЕЛЬ ГИЛБЕРТ ЗАМЕТИЛ: «БЕЛКА, ПРЯЧУЩАЯ ОРЕХ В МОЕМ САДУ, «ЗНАЕТ» О БУДУЩЕМ СТОЛЬКО ЖЕ, СКОЛЬКО ПАДАЮЩИЙ КАМЕНЬ «ЗНАЕТ» О ЗАКОНЕ ТЯГОТЕНИЯ». ДЕЙСТВИТЕЛЬНО, ОРЕХИ ЗАПАСАЮТ ДАЖЕ МОЛОДЫЕ БЕЛКИ, НИКОГДА НЕ ВИДЕВШИЕ ЗИМЫ. ЖИВОТНЫЕ СОВЕРШАЮТ КАКИЕ-ТО ДЕЙСТВИЯ, НЕ ПОНИМАЯ, ПОЧЕМУ ОНИ ЭТО ДЕЛАЮТ, И КАКОВЫ ДОЛГОСРОЧНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ЭТИХ ДЕЙСТВИЙ. ИЗВЕСТНО, ЧТО КОГДА-ТО И ДРЕВНИЕ ЛЮДИ СОВЕРШАЛИ ДОСТАТОЧНО СЛОЖНЫЕ ТЕЛОДВИЖЕНИЯ, НЕ ЗАДУМЫВАЯСЬ О ТОМ, ЧТО ПРОИЗОЙДЕТ ЧЕРЕЗ 9 МЕСЯЦЕВ.

В другом эксперименте Клейтон и ее коллеги использовали известные преступные наклонности соек. Если одна сойка застанет другую сойку, прячущую еду, она вполне способна пойти на воровство. Все сойки знают об этой опасности и в качестве контрмеры частенько перепрятывают свои запасы. Если они замечают, что за ними следят, позднее они могут вернуться, но не для того, чтобы съесть лакомство, а чтобы спрятать его в новом месте. Клейтон и ее коллеги показали: если сойка заметила, что за ней следят, она с большей вероятностью вернется и перепрячет еду. Такое поведение требует мысленного перемещения во времени, поскольку сойка предвидит возможный ход событий, когда какой-нибудь жулик посягнет на ее запасы. В результате подобных наблюдений Клейтон пришла к выводу, что сойки способны мысленно переноситься в будущее²⁵².

Однако голубые сойки – не единственные животные, которые, возможно, совершают такие мысленные путешествия. Ученые многократно исследовали способность предвидения у крупных человекообразных обезьян (шимпанзе, бонобо, горилл и орангутанов).

Один вариант эксперимента заключается в том, чтобы узнать, могут ли человекообразные обезьяны понять назначение денег. В частности, в одном исследовании ученые анализировали поведение обезьян, которых научили обменивать жетоны на еду. Обезьяны знали, что

²⁵² Clayton and Dickinson, 1999; Raby et al., 2007; Clayton et al., 2009.

люди соглашаются обменивать на еду некоторые (но не все) виды жетонов, например, окрашенные кусочки пластиковой трубки. Кроме того, животные знали, что через полчаса после того, как они получают доступ к источнику жетонов, у них будет возможность обменять «ценные» жетоны на еду. Вопрос заключался в следующем: сколько таких жетонов соберут обезьяны, прежде чем отправятся в зал ожидания, где смогут получить пищу. Шесть из восьми животных брали больше цветных жетонов в том случае, когда обмен был возможен, по сравнению с контрольным экспериментом, когда обмена не было. Орангутаны справлялись с заданием лучше, чем бонобо, а те, в свою очередь, лучше, чем шимпанзе. В целом, по-видимому, некоторые человекообразные обезьяны обладают достаточным предвидением, чтобы, отправляясь на рынок, захватить с собой кошелек²⁵³ (что лично я иногда делать забываю).

ЕСЛИ ОДНА СОЙКА ЗАСТАНЕТ ДРУГУЮ СОЙКУ, ПРЯЧУЩУЮ ЕДУ, ОНА ВПОЛНЕ СПОСОБНА ПОЙТИ НА ВОРОВСТВО. ВСЕ СОЙКИ ЗНАЮТ ОБ ЭТОЙ ОПАСНОСТИ И В КАЧЕСТВЕ КОНТРОЛЕРА ЧАСТЕНЬКО ПЕРЕПРЯТЫВАЮТ СВОИ ЗАПАСЫ. ЕСЛИ ОНИ ЗАМЕЧАЮТ, ЧТО ЗА НИМИ СЛЕДЯТ, ПОЗДНЕЕ ОНИ МОГУТ ВЕРНУТЬСЯ, НО НЕ ДЛЯ ТОГО, ЧТОБЫ СЪЕСТЬ ЛАКОМСТВО, А ЧТОБЫ СПРЯТАТЬ ЕГО В НОВОМ МЕСТЕ.

Однако не все ученые соглашаются, что такое поведение подразумевает мысленное перемещение во времени. Возможно, обезьяны просто бездумно запоминают некую последовательность действий – гораздо более сложную, чем крысы, нажимающие на рычаг. Кроме того, наблюдаемый в экспериментах эффект часто довольно слабый: в частности, не все птицы и обезьяны вели себя одинаково в описанных экспериментах.

Тем не менее подобные исследования показывают, что некоторые животные умеют корректировать свое поведение, чтобы удовлетворить потребность, которая может возникнуть в будущем. Споры о том, умеют ли животные мысленно перемещаться во времени, будут продолжаться до тех пор, пока ученые не выработают универсальное определение мысленного перемещения во времени.

ЖИТЬ В НАСТОЯЩЕМ

Даже если наши ближайшие ныне живущие родственники действительно способны осуществлять мысленные перемещения во времени, понятно, что от нас в этом плане они очень сильно отстают. Специалист по приматам Джейн Гудолл утверждает: «Шимпанзе могут выучить язык жестов, но в дикой природе, насколько нам известно, они не могут обсуждать друг с другом отсутствующие в настоящий момент предметы. Они не знают, что случилось 100 или 10 лет назад, но иногда в некоторых местах испытывают страх. И, конечно же, они не могут составлять план действий на 5 лет вперед»²⁵⁴.

Люди не только рассказывают друг другу о прошлом и строят планы на будущее, но и могут мысленно перемещаться во времени вперед и назад, чтобы выразить в речи сложные временные связи. Рассмотрим в качестве примера предложение: *В прошлом месяце проповедник предсказал конец света в ближайшие три месяца, так что в будущем месяце я потрачу все мои сбережения*. Разве может какое-нибудь животное, не умея пользоваться речью и не зная простейшей арифметики, понять смысл столь сложной во временном отношении фразы?

²⁵³ Osvath and Persson, 2013; Bourjade et al., 2014; Scarf et al., 2014. Две популярные книги, рассказывающие о возможности мысленных перемещений во времени у животных: Corballis, 2011; Suddendorf, 2013.

²⁵⁴ <http://www.spectator.co.uk/features/5896113/if-we-have-souls-then-so-do-chimps/> (5/15/2015).

Некоторые доказательства взаимозависимости между речью, вычислениями и мысленными перемещениями во времени были получены при изучении живущего в долине Амазонки племени пираха, занимающегося охотой и собирательством. В их языке есть простые формы прошлого и будущего времени, но нет грамматических форм для выражения сложных временных построений типа «к следующему месяцу у меня закончатся все деньги» (в этом контексте глагол «закончиться», стоящий в будущем времени, означает действие, которое в какой-то момент окажется в прошлом).

В отношении чисел люди племени пираха используют систему *один-два-много*: все, что больше двух, это уже «много». Они могут различать большие и малые числа, такие как 10 и 5, но с трудом сравнивают количество предметов в двух наборах. Если положить на стол четыре пальчиковые батарейки и попросить их выложить столько же орехов, они справятся с заданием, но, скорее всего, не смогут этого сделать, если на столе будет десять батареек. Не удивительно, что с такой системой исчисления они, по-видимому, не имеют представления о собственном возрасте²⁵⁵.

Лингвист и бывший миссионер Дэниел Эверетт считает, что пираха живут в настоящем времени: «Пираха не запасают пищу, не строят планы больше чем на день вперед и не говорят об отдаленном прошлом или отдаленном будущем – кажется, что они полностью сфокусированы на настоящем»²⁵⁶. Поначалу Эверетт учил язык племени пираха, перевел на него Библию и пытался обратить туземцев в христианство. Он свободно овладел их языком, но не преуспел в миссионерской деятельности, поскольку пираха сделали его атеистом.

Эверетт считает, что отчасти это было связано с их скептицизмом и отсутствием интереса к событиям, которые они не переживали лично или о которых не слышали от окружающих: они потеряли интерес к Иисусу, когда поняли, что Эверетт никогда его не видел. Аналогичным образом их мало беспокоит будущее или то, что произойдет после их смерти.

Эверетт не считает, что недалёковидность людей племени пираха связана с каким-то наследственным неврологическим нарушением, поскольку они умны и прекрасно приспособлены к жизни в джунглях: «Они могут уйти в джунгли нагишом, без оружия и инструментов, а через три дня вернуться с корзинами фруктов, орехов и мелкой дичи»²⁵⁷. Скорее, по мнению Эверетта, существование в настоящем времени – отпечаток их культуры.

Такое моментальное существование, совершенно очевидно, объясняется внешними факторами, в том числе, практически постоянным обилием пищи. Подобное безразличие к будущему не могло возникнуть, скажем, у эскимосов, которым, чтобы пережить зиму, требуется провести большую подготовительную работу.

ОТПРАВЛЯЕМ СООБЩЕНИЯ В БУДУЩЕЕ

Разные люди и разные культуры очень сильно различаются в том, сколько мыслей и усилий они направляют в будущее и как далеко вперед они заглядывают. Каждый из нас знает людей, живущих одним днем, подобно пираха: обычно эти люди кажутся удовлетворенными жизнью, даже при наличии финансовых или семейных проблем. На другом краю спектра – люди, чьи дела и помыслы полностью нацелены на выполнение какой-то отдаленной задачи²⁵⁸.

²⁵⁵ Gordon, 2004. «Пираха не имеют представления ни о собственном возрасте, ни о временных построениях типа «как давно вы знаете...»». Персональное сообщение Дэниела Эверетта (3/4/2009).

²⁵⁶ Everett, 2008, 132.

²⁵⁷ Colapinto, 2007.

²⁵⁸ Психологи попытались классифицировать представления людей о времени. Например, Зимбардо просил участников опросов оценить по пятибалльной шкале свое согласие с утверждениями следующего типа: *Вы не можете по-настоящему планировать будущее, поскольку все постоянно изменяется; Мне доставляет удовольствие думать о прошлом; Все редко происходит так, как я ожидал*. В зависимости от ответов людей подразделяли на тех, кто негативно оценивает прошлое,

А еще есть мечтатели, которые заглядывают на десятилетия и столетия вперед. Такая способность мысленно переносится во времени на срок, превышающий продолжительность жизни одного человека, возможно, является краеугольным камнем всей человеческой культуры. Через сказания, наскальные рисунки, каменные и деревянные таблички, а позднее через папирусы и книги *Homo sapiens* отправлял и продолжает отправлять сообщения будущим поколениям.

В 2004 г. гигантская волна цунами унесла жизнь 230 000 человек из 14 стран, расположенных на побережье Индийского океана. Один таиландский остров, населенный народностью мокен (из группы «морских цыган»), пострадал очень сильно, однако почти никто из живущих там людей не погиб.

Старейшины народа мокен знают легенды о голодных духах моря. Они считают, что предшествующее цунами отступление воды свидетельствует о голоде моря, и поэтому люди убегают на самую высокую точку острова до того, как на берег обрушивается гигантский шквал воды. По их мнению, цунами возникает по той причине, что «большая волна давно никого не ела и хочет попробовать опять»²⁵⁹.

Рассказы людей, переживших цунами в прошлом, передавались через столетия и сохранялись не в семантической памяти (как скучный факт «когда море отступает, нужно бежать в высокое место»), но в эпизодической памяти в виде эмоционально и визуально богатых образов о том, что значит быть съеденным морем.

Семантические и эпизодические воспоминания, хранящиеся в сетях нейронов нашего мозга, – это ключ к выживанию. Однако воспоминания каждого отдельно взятого человека ограничены, неточны и умирают вместе с ним. Мысленные перемещения во времени позволяют понять, что будущие поколения могут извлечь из этих воспоминаний, и создать внешние устройства для хранения этих воспоминаний, с помощью которых никогда не видевшие друг друга люди смогут обмениваться знаниями. Без этой устремленности в будущее и передающихся из поколения в поколение воспоминаний не было бы современной культуры, технологии и науки.

ВРЕМЕННАЯ БЛИЗОРУКОСТЬ

Люди – единственные существа на Земле, способные представлять себе и планировать отдаленное будущее. Только мы сеем семена, которые смогут принести плоды лишь через много лет, и строим здания, которые простоят столетия. Но при этом многие самые серьезные проблемы современного человека (а также других существ) являются следствием нашей недалекновидности.

Множество финансовых проблем и проблем со здоровьем связаны с нашей временной близорукостью. Часто именно этим объясняются такие неприятные проблемы, как кредитные долги или маленькая пенсия: мы либо тратим деньги, которые не следовало тратить, или не можем отложить про запас то, что пригодилось бы в будущем²⁶⁰. Мы часто поддаемся искушению быстрых диет и не выдерживаем регулярных физических упражнений, что отрицательно сказывается на нашем здоровье в долгосрочном плане. А если говорить об обществе в целом, экономические неурядицы часто возникают в результате тех же пороков, что и на индивидуальном уровне. Правительство, как и отдельные граждане, часто откладывает непопулярные меры и продолжает брать в долг вместо того, чтобы повысить налоги или снизить расходы. Рас-

позитивно оценивает прошлое, фаталистов в настоящем, гедонистов в настоящем и людей, нацеленных на будущее (Zimbardo and Boyd, 2008).

²⁵⁹ <http://www.cbsnews.com/news/sea-gypsies-saw-signs-in-the-waves/> (5/15/2015).

²⁶⁰ <http://money.usnews.com/money/blogs/the-best-life/2013/06/20/retirement-shortfall-may-top-14-trillion> (12/9/2015).

туший долг, в свою очередь, ведет к финансовому краху с глубокими долгосрочными последствиями, включая безработицу и подрыв пенсионной системы. Даже в отсутствие экономического кризиса пенсионные фонды постоянно недополучают средства. Причин множество, но в конечном итоге все они сводятся к знаменитому изречению Марка Твена: «Никогда не откладывай на завтра то, что можно сделать послезавтра»²⁶¹.

Заметным симптомом нашей временной близорукости на уровне всего общества является изменение климата. Даже если мы осознаем долгосрочное влияние наших действий на состояние планеты, мы с трудом предпринимаем какие-либо шаги, чтобы что-то изменить. Хотя мы умеем предвидеть будущее, порой нам не удается позаботиться о том, что произойдет после нашей жизни.

Как игрок, который надеется, что следующий раунд игры разрешит все его проблемы, так и мы со своей недальновидностью совершаем действия, которые лишь усугубляют долгосрочные проблемы. Возможно, самым неприятным следствием нашей близорукости является то, что мы своими руками снижаем эффективность демократических преобразований в обществе. Представьте себе ситуацию, когда сто из ста экономистов соглашаются в том, что лучшим долгосрочным решением экономических проблем является немедленное повышение налогов. Но вот приходит время правительственных выборов, и кто, по вашему мнению, выиграет: политик, соглашающийся с мнением экспертов, или тот, кто пообещает снизить налоги?

Истина в том, что, хотя люди намного лучше других животных могут составлять планы на будущее, мы все же недостаточно хорошо справляемся с этой задачей. И в этом нет ничего удивительного. Человеческий мозг – продукт эволюционного процесса длительностью в несколько сотен миллионов лет, и по большей части наш мозг сформировался в ходе эволюции животных, которые – в когнитивном плане – существуют в бесконечном настоящем. Так что, человек как вид все еще учится применять эту новую способность и делать выбор между немедленным вознаграждением и долгосрочным благополучием.

Что вы выберете: 1000 долларов сейчас или 2000 через год? На этот вопрос нет «правильного» или «неправильного» ответа, хотя любой экономист скажет вам, что прибыль в 100% годовых – это очень много. Это классический пример *межвременного выбора*: немедленное получение имеющейся на данный момент прибыли или отсроченное получение большей прибыли. Мы постоянно стоим перед подобным выбором. Следует ли мне купить самый современный телевизор сегодня, взяв кредит, или подождать несколько месяцев, пока у меня на счету появятся деньги? Сыграть ли еще раз в видеоигру или отправиться на работу? Купить ли более дорогой экологический автомобиль, чтобы внести свой микроскопический вклад в благополучие будущих поколений?

Существует такое явление, как снижение субъективной стоимости вещей с течением времени. Тысяча долларов сегодня в каком-то вполне реальном смысле «ценнее» той же суммы, полученной через год. Есть вероятность, что через год меня не станет, и тогда эта 1000 долларов не будет иметь для меня никакой ценности. Или более естественный пример: для наших древних предков небольшая порция еды, полученной непосредственно сейчас, означала намного больше, чем гораздо более значительная порция через месяц, поскольку за этот месяц они вполне могли погибнуть от голода.

На протяжении большей части своего существования человек жил в непредсказуемом мире, где ему постоянно угрожали дикие звери, болезни и голод. В таких неблагоприятных условиях обеспечение выживания в конкретный момент означает гораздо больше, чем роскошь размышлений о будущем. Так что нет ничего удивительного в том, что люди привыкли выбирать немедленное вознаграждение.

²⁶¹ Джеймс Суrowецки предлагает краткий обзор хронических проблем пенсионных фондов: Surowiecki, 2013. Из того же источника взята цитата из Марка Твена.

Количественно оценить равновесие между немедленным и отсроченным вознаграждением можно путем опросов, как в предыдущем примере. Варьируя размер вознаграждения и отсрочки, можно установить *скорость снижения субъективной стоимости* вещей в том или ином контексте.

Конечно же, в популяции наблюдается весьма заметная вариабельность. Например, в одном исследовании некоторые опрошенные оказались очень терпеливыми и согласились ждать 6 месяцев, чтобы получить 25 долларов вместо 20 долларов сегодня. Другие же были гораздо менее терпеливыми и не согласились ждать месяц, чтобы получить 68 долларов вместо 20 долларов сегодня²⁶².

Многочисленные исследования показывают, что скорость снижения субъективной стоимости, определенная в подобных опросах, коррелирует обратным образом со здоровьем, финансовой стабильностью и отсутствием вредных привычек²⁶³. Иными словами, люди, выбирающие небольшое вознаграждение сегодня вместо более крупного вознаграждения потом, чаще имеют финансовые или медицинские проблемы.

Если людям предлагают выбрать между 100 долларами сейчас и 120 долларами через месяц, большинство предпочитает получить деньги немедленно. Но как вы думаете, что выбирают люди, если им предложить 100 долларов через месяц или 120 через два месяца? Из логических соображений, если кто-то предпочитает 100 долларов сейчас, нежели 120 через месяц, он выберет 100 долларов через месяц, а не 120 через два месяца – в обоих случаях для получения дополнительных 20 долларов придется ждать целый месяц. Однако это не так²⁶⁴. Если выбор совершается в будущем, люди оказываются более терпеливыми. Нет смысла ждать месяц, чтобы получить на 20 долларов больше, если можно получить 100 долларов сегодня, но если все равно придется подождать, можно подождать и подольше. Другими словами, мы предпочитаем немедленное вознаграждение не потому, что нам не хочется ждать дополнительные 20 долларов еще целый месяц: просто нам нравится получать что-то немедленно!

И эту нашу склонность к получению немедленного вознаграждения часто используют финансовые институты и рынки. Например, когда мы расплачиваемся кредитной картой, мы не так остро ощущаем, как расстаемся с заработанными непосильным трудом деньгами. Исследования показывают, что при оплате кредитной картой люди готовы тратить большие суммы, чем при оплате наличными. В одном исследовании выяснилось, что студенты готовы заплатить за билеты на различные спортивные соревнования в два раза больше, если можно заплатить по карте, а не наличными²⁶⁵. Более того, кредитные карты заставляют нас влезать в долги, предоставляя немедленные «награды» (самолетные мили, различные бонусы или возврат процентов) каждый раз, когда мы что-то покупаем: *тратьте больше, получайте больше!* Понятное дело, что за все эти «награды» платят сами потребители²⁶⁶.

Многие фантастические достижения в науке, технологии и культуре стали возможны благодаря нашей способности совершать мысленные перемещения во времени и составлять планы на будущее. Но при этом наши личные и общественные проблемы часто объясняются тем, что при принятии решений мы склонны выбирать немедленный выигрыш²³. К счастью, в наших генах не записано, как мы должны осуществлять выбор между краткосрочной и долгосрочной выгодой. Способность дожидаться прибыли и принимать оптимальные межвременные реше-

²⁶² Kable and Glimcher, 2007.

²⁶³ Critchfield and Kollins, 2001; Wittmann and Paulus, 2007; Seeyave et al., 2009; MacKillop et al., 2011.

²⁶⁴ Frederick et al., 2002.

²⁶⁵ Prelec and Simester, 2001; Raghuram and Srivastava, 2008.

²⁶⁶ В конечном итоге подобное вознаграждение оплачивается владельцами кредитных систем, и цены розничной торговли должны это учитывать.

ния вырабатывается под влиянием практики, обучения, дискуссий и просто размышлений о будущем.

НАШУ СКЛОННОСТЬ К ПОЛУЧЕНИЮ НЕМЕДЛЕННОГО ВОЗНАГРАЖДЕНИЯ ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЮТ ФИНАНСОВЫЕ ИНСТИТУТЫ И РЫНКИ. НАПРИМЕР, КОГДА МЫ РАСПЛАЧИВАЕМСЯ КРЕДИТНОЙ КАРТОЙ, МЫ НЕ ТАК ОСТРО ОЩУЩАЕМ, КАК РАССТАЕМСЯ С ЗАРАБОТАННЫМИ НЕПОСИЛЬНЫМ ТРУДОМ ДЕНЬГАМИ. ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКАЗЫВАЮТ, ЧТО ПРИ ОПЛАТЕ КРЕДИТНОЙ КАРТОЙ ЛЮДИ ГОТОВЫ ТРАТИТЬ БОЛЬШИЕ СУММЫ, ЧЕМ ПРИ ОПЛАТЕ НАЛИЧНЫМИ.

Например, исследования показывают, что скорость снижения субъективной стоимости вещей можно изменить (и тем самым склонить людей к принятию менее импульсивных решений) путем вовлечения людей в мысленное перемещение во времени. В одном исследовании участникам опроса предлагали серию вариантов (например, *20 долларов сейчас против 60 долларов через месяц*). При этом в каких-то случаях упоминалось такое вознаграждение, как, например, *каникулы в Париже*, что заставляло участников представить себе будущее событие. В таких случаях участники опроса были менее импульсивны, т. е. чаще выбирали отсроченное вознаграждение, по сравнению с контрольной группой²⁶⁷. Таким образом, само по себе мысленное перемещение во времени дает нам возможность избавиться от склонности к быстрому получению вознаграждения.

МОЗГ И МЫСЛЕННОЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЕ ВО ВРЕМЕНИ

Что дает человеку уникальную способность совершать мысленные путешествия во времени? Есть ли в наших нейронах что-то особенное? А, может быть, все дело в размере мозга? Или в человеческом мозге есть какие-то специфические зоны, которых нет у других животных?

Ученые вряд ли смогут найти различия в нейронах мыши и человека путем измерения их электрической активности. Да и под микроскопом нейроны всех млекопитающих выглядят практически одинаково. Мозг человека, безусловно, отличается по размеру, но он не самый большой в царстве животных. Понятное дело, чем крупнее животное, тем крупнее у него мозг, так что мозг кита или слона намного больше человеческого. Если принять во внимание массу тела, человек отличается от многих других животных, но, опять-таки, рекорд принадлежит не ему. Наоборот, у мелких животных соотношение размера мозга к размеру тела обычно больше, так что даже у мышей это отношение чуть больше, чем у человека. А рекорд принадлежит крохотной тупайе: масса мозга этого двухсотграммового животного составляет 10% массы его тела (у человека этот показатель равен примерно 2%). И только если принять во внимание, что связь между массой мозга и массой тела не является линейной (это учитывается с помощью так называемого *коэффициента энцефализации*²⁶⁸), человек выходит в лидеры. Человеческий мозг более чем в 7 раз больше по отношению к массе тела, чем следовало бы ожидать на основании зависимости между массой мозга и массой тела для всех позвоночных животных. Коэффициент энцефализации дельфинов чуть больше 5, шимпанзе – около 2,5, а мыши – всего 0,5²⁶⁹.

Нет сомнений, что масса мозга, выраженная через коэффициент энцефализации, отчасти определяет уникальные когнитивные способности человека. Однако какую-то роль играет

²⁶⁷ Peters and Büchel, 2010. See also Hakimi and Hare, 2015.

²⁶⁸ Коэффициент энцефализации – мера относительного размера мозга, определяющаяся как отношение фактически наблюдаемой массы мозга к средней прогнозируемой массе мозга для млекопитающего того или иного размера. – *Прим. ред.*

²⁶⁹ Herculano-Houzel, 2009; Fox, 2011.

также относительный размер специфических отделов мозга. Например, слуховая кора у приматов и грызунов имеет примерно одинаковое отношение к размеру мозга в целом, а вот некоторые другие области у приматов гораздо более развиты. В частности, это относится к префронтальной коре.

Префронтальная кора, находящаяся в области лба, выгодно расположена в том смысле, что может воспринимать сигналы из многих других областей мозга и оказывать на них влияние. У приматов эта часть мозга пропорционально гораздо более развита, чем у других животных, однако нельзя сказать, что ее относительный размер у человека больше, чем у человекообразных обезьян²⁷⁰. Впрочем, некоторые данные показывают, что префронтальная кора человеческого мозга отличается по другим параметрам: например, между нейронами префронтальной коры человека обнаружено больше синапсов²⁷¹.

В чем заключается функция префронтальной коры? На первый взгляд, у людей с повреждением этой зоны мозга нет никаких выраженных особенностей. Их двигательные функции сохранены, они нормально воспринимают речь и нормально говорят. Однако в зависимости от точной локализации повреждения у этих людей проявляются разного рода нарушения когнитивных функций более высокого порядка. Это могут быть нарушения краткосрочной памяти, личностного восприятия, внимания, способности принимать решения и социального поведения. Такие люди могут следовать инструкциям и нормально выполнять многие задания, но они с трудом решают многостадийные задачи и адаптируются к изменению условий²⁷².

ПОД МИКРОСКОПОМ НЕЙРОНЫ ВСЕХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ ВЫГЛЯДЯТ ПРАКТИЧЕСКИ ОДИНАКОВО. МОЗГ ЧЕЛОВЕКА, БЕЗУСЛОВНО, ОТЛИЧАЕТСЯ ПО РАЗМЕРУ, НО ОН НЕ САМЫЙ БОЛЬШОЙ В ЦАРСТВЕ ЖИВОТНЫХ. ПОНЯТНОЕ ДЕЛО, ЧЕМ КРУПНЕЕ ЖИВОТНОЕ, ТЕМ КРУПНЕЕ У НЕГО МОЗГ, ТАК ЧТО МОЗГ КИТА ИЛИ СЛОНА НАМНОГО БОЛЬШЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО. ЕСЛИ ПРИНЯТЬ ВО ВНИМАНИЕ МАССУ ТЕЛА, ЧЕЛОВЕК ОТЛИЧАЕТСЯ ОТ МНОГИХ ДРУГИХ ЖИВОТНЫХ, НО, ОПЯТЬ-ТАКИ, РЕКОРД ПРИНАДЛЕЖИТ НЕ ЕМУ. НАОБОРОТ, У МЕЛКИХ ЖИВОТНЫХ СООТНОШЕНИЕ РАЗМЕРА МОЗГА К РАЗМЕРУ ТЕЛА ОБЫЧНО БОЛЬШЕ, ТАК ЧТО ДАЖЕ У МЫШЕЙ ЭТО ОТНОШЕНИЕ ЧУТЬ БОЛЬШЕ, ЧЕМ У ЧЕЛОВЕКА. А РЕКОРД ПРИНАДЛЕЖИТ КРОХОТНОЙ ТУПАЙЕ: МАССА МОЗГА ЭТОГО ДВУХСОТГРАММОВОГО ЖИВОТНОГО СОСТАВЛЯЕТ 10% МАССЫ ЕГО ТЕЛА (У ЧЕЛОВЕКА ЭТОТ ПОКАЗАТЕЛЬ РАВЕН ПРИМЕРНО 2%).

Кроме того, префронтальная кора проявляет активность при составлении долгосрочных планов, выборе отсроченного вознаграждения и мысленных перемещениях во времени (таким образом, люди с повреждениями этой области мозга не относятся к числу тех, кто копит себе на пенсию). В одном исследовании с участием таких пациентов был проведен анализ изменения субъективной стоимости вещей во времени. По сравнению со здоровыми людьми или людьми с повреждениями других участков мозга пациенты с повреждениями префронтальной коры гораздо чаще выбирали небольшое немедленное вознаграждение, нежели более крупное вознаграждение через какое-то время²⁷³. Аналогичным образом некоторые данные томографии

²⁷⁰ Purves et al., 2008.

²⁷¹ Jacobs et al., 2001; Wood and Grafman, 2003; Wise, 2008; Fuster and Bressler, 2014.

²⁷² Atance and O'Neill, 2001; Fuster and Bressler, 2014.

²⁷³ Sellitto et al., 2010; Peters, 2011. Это упрощенная картина, поскольку, на самом деле, префронтальная кора далее под-разделяется на другие отделы, включая те, которые ответственны за выбор быстрого вознаграждения.

мозга показывают, что степень активности участков префронтальной коры коррелирует с тем, как долго участники подобных тестов готовы ждать вознаграждения²⁷⁴.

Анализ активности мозга здоровых людей тоже позволяет предположить, что префронтальная кора участвует в мысленных перемещениях во времени. Например, когда людей просят представить себе развитие событий с участием знакомого им человека и в знакомом месте, активность префронтальной коры выше, чем когда просят просто составить предложения с упоминанием тех же людей и мест. Более того, префронтальная кора более активна, когда люди представляют себе возможное развитие событий в будущем, чем когда они вспоминают эпизоды из прошлого²⁷⁵.

Но даже если префронтальная кора действительно задействована в мысленных перемещениях во времени, наивно было бы предполагать, что эта функция реализуется именно в этой области мозга. Приписывать какую-то конкретную функцию специфической области мозга – все равно что смотреть футбол и спрашивать, какой игрок отвечает за забивание голов: понятно, что защитники и нападающие выполняют разные функции, но игра ведется совместными усилиями команды, и забить мяч может любой игрок.

Мысленное путешествие в будущее – сложная задача с привлечением целого ряда когнитивных функций мозга, включая подбор эпизодических и семантических воспоминаний, использование этих воспоминаний для составления сценария будущего события, понимание разницы между прошлым и будущим и позитивную или негативную оценку последствий такого развития событий. Кроме того, недостаточно просто вообразить предстоящее событие: мы должны запоминать то, что вообразили. Иными словами, мы должны учиться на этом мысленном моделировании. Если вы собираетесь в турпоход, вы обращаетесь к собственным воспоминаниям о предыдущих походах и решаете, какие вещи взять с собой. Кроме того, вы экстраполируете предыдущие ситуации для моделирования наихудшего возможного сценария: *что будет, если я сломаю лодыжку, или меня укусит змея?* Как только вы смоделировали эту ситуацию (и приняли решение все же пойти в поход), важно сделать выводы из этих моделей и осуществить соответствующие приготовления на случай подобного развития событий.

Учитывая когнитивную сложность мысленных перемещений во времени, логично предположить, что этот процесс осуществляется совместными усилиями разных областей мозга. Действительно, анализ патологий и визуализация активности мозга в разных ситуациях показывают, что в мысленных перемещениях во времени задействовано несколько участков мозга. Как мы помним, страдавшему амнезией пациенту К. С. было трудно не только вспомнить эпизоды из прошлого, но и рассуждать о том, что он будет делать в будущем. У этого пациента основное повреждение пришлось на височную долю мозга, где находится гиппокамп. В одном исследовании людей с повреждением в центральной части височной доли мозга просили вообразить и описать различные сценарии будущего, например, выигрыш в лотерею. По сравнению со здоровыми людьми такие пациенты давали весьма бедное и неподробное описание возможных событий²⁷⁶.

Как и многие другие сложные когнитивные задачи, мысленное путешествие во времени совершается при совместной работе многих областей мозга, каждая из которых вносит свой специфический вклад. В случае мысленных перемещений во времени срединный участок височной доли может обеспечивать доступ к прошлому опыту, тогда как префронтальная кора может гибко манипулировать этими воспоминаниями для создания нового сценария. Интересно, что для мысленных перемещений во времени, по-видимому, не требуется способность определять время. Как календарь, который отражает, но не сообщает время (в отличие от

²⁷⁴ McClure et al., 2004.

²⁷⁵ Botzung et al., 2008; Benoit and Schacter, 2015.

²⁷⁶ Hassabis et al., 2007; Race et al., 2011; Kwan et al., 2012.

часов), сети нейронов, ответственные за мысленное перемещение во времени, должны отражать прошлое, настоящее и будущее, но вовсе не должны уметь отмерять ход времени.

Появление у животных способности предсказывать смену сезонов и предчувствовать поведение хищников, жертв и потенциальных партнеров было мощнейшей эволюционной адаптацией. Следующим этапом эволюции стало мысленное перемещение во времени, на фоне которого простое предвидение событий во внешнем мире превратилось в устаревшую технологию. Мысленное перемещение во времени позволяет людям продвинуться от пассивного предсказания будущего до его активного созидания. Не хватает пищи? Создадим сельское хозяйство и получим столько пищи, сколько нужно. Недостаточно воды для сельскохозяйственной деятельности? Построим дамбы, каналы и ирригационные системы.

Как наши предки приобрели эту способность мысленно переноситься в прошлое и в будущее? Мы поняли суть времени по той причине, что научились мысленно перемещаться во времени, или смогли путешествовать во времени, потому что осознали концепцию прошлого, настоящего и будущего? Ответы на эти вопросы нельзя получить на основании экспериментов над животными. Хотя голубые сойки и высшие приматы умеют адаптировать свои действия в настоящий момент в соответствии с желаемым развитием ситуации в будущем, однако их способность мыслить о будущем или, если хотите, мысленно перемещаться во времени, безусловно, не идет ни в какое сравнение со способностью человека. Трудно составлять планы на дни, месяцы и годы вперед, не имея семантических представлений о понятиях дня, месяца и года или не умея уловить суть концепции времени. Мысленное перемещение во времени – многомерная когнитивная способность. Скорее всего, это результат конвергенции многочисленных эволюционных путей, включая развитие семантической и эпизодической памяти, речи, восприятия чисел и понимания концепции линии времени.

Как уже говорилось выше, способность мысленно перемещаться во времени – одновременно и дар, и проклятие. Наши путешествия в будущее обычно переносят нас в такие места, где, как нам кажется, лучше, чем там, где мы есть сейчас, и зачастую позволяют ускользнуть от забот настоящего. Но, как показывает философия Эйнштейна, бегство в прошлое или в будущее мешает нам понять, что важнейший источник радости находится здесь и сейчас²⁷⁷.

Вот что пишет по этому поводу Дэниел Эверетт: «Пираха просто концентрируются на настоящем и, тем самым, одним ударом уничтожают множество источников беспокойства, страха и безнадежности, которыми охвачены столь многие из нас в западном обществе». Но жизнь в настоящем обеспечивает как более беззаботное, так и менее надежное существование (средняя продолжительность жизни людей племени пираха составляет около 45 лет, и это без учета детской смертности)²⁷⁸. Обеспечение постоянного источника пищи и постоянного жилья, решение научных и артистических задач, а также предотвращение и лечение заболеваний требуют предвидения и планирования в широком масштабе. И именно в этом заключается парадокс мысленных перемещений во времени: кажется, что эта способность одновременно является и решением всех наших проблем, и их причиной.

²⁷⁷ Gilbert, 2007; Killingsworth and Gilbert, 2010.

²⁷⁸ Everett, 2008, 273.

12:00

СОЗНАНИЕ: СВЯЗЬ ПРОШЛОГО И БУДУЩЕГО

Есть гипотеза, что в тот миг, когда кто-то постигнет истинное предназначение Вселенной и причины ее существования, она немедленно исчезнет, а на ее месте возникнет нечто еще более странное и необъяснимое. Есть и другая гипотеза, гласящая, что это уже произошло.

ДУГЛАС АДАМС²⁷⁹

Что воспринимает новорожденный ребенок, когда впервые открывает глаза? Очевидно, смесь несфокусированных образов, линий и пятен, лишенных смысла и не поддающихся интерпретации. Но когда мы с вами смотрим вокруг, мы видим целостную и великолепную картину мира: разбивающиеся о песчаный берег волны, ныряющего зимородка и даже собственное отражение на поверхности воды. Обычно, по ошибке, мы воспринимаем эти образы как реальность. На самом же деле, эти образы в лучшем случае каким-то образом коррелируют с физической реальностью. Например, видимые нами цвета – лишь интерпретация длины волны электромагнитного излучения, столь же произвольная, как связь между буквами алфавита и звуками, которые мы им присвоили. В худшем случае мы видим некую фикцию, навязанную мозгу изнутри – от видений больного шизофренией и наркотических галлюцинаций до сновидений. А сколько всего мы не видим! Мы не видим бактерий на собственной коже, бесчисленные галактики в небесах, мю-мезоны в атмосфере или инфракрасное излучение вокруг нас.

Ощущение течения времени (наше ощущение изменений) тоже представляет собой ментальный конструкт. Нейробиологи считают, что это ощущение коррелирует с реальностью: мы воспринимаем разбивающиеся о берег волны и ныряющего зимородка именно по той причине, что *время идет* – эти события разворачиваются во времени во вселенной, в которой реально только настоящее. Многие физики и философы соглашались, что ход времени – это ментальный конструкт, но никакого эквивалента для него в физическом мире не существует. В «блоке вселенной» этернализма наше ощущение течения времени скорее сравнимо с видениями шизофреника – с тем, что существует только внутри нас.

Эти две точки зрения создают несогласующиеся концепции времени, но в рамках обеих концепций наше ощущение течения времени является важной проблемой. К сожалению, решить эту проблему чрезвычайно сложно, поскольку наше субъективное ощущение времени находится в центре клубка неразрешенных научных загадок, касающихся сознания, свободы воли, относительности, квантовой механики и природы времени.

ОСКОЛКИ ВРЕМЕНИ

Давайте на минуту представим, что мы живем в презентистской вселенной, где реально только настоящее. Наше осознанное восприятие времени соответствует идее презентизма, поскольку сознание, как нам кажется, составляет непрерывный отчет о разворачивающихся вокруг нас событиях. Однако это тоже иллюзия: хотя мозг бессознательно собирает и обрабатывает информацию об окружающем мире, сознание формируется прерывистым образом. Мозг предоставляет информацию сознанию неосознанно и урывками.

²⁷⁹ Дуглас Адамс (1952–2001) – английский писатель и сценарист; автор знаменитой серии книг «Автостопом по галактике». – Прим. перев.

Когда вы слушаете монолог, произносимый актером со сцены, вы воспринимаете не непрерывный поток слогов – в вашем мозге материализуются полностью оформленные и осмысленные слова и фразы. Конечно, вы легко идентифицируете отдельно произнесенный слог «по», но вы не вычленяете его, когда слышите слово «гиппокамп», и не выделяете в этом слове никаких других осмысленных фрагментов. Очевидно, что наш мозг не делает линейный и прямой репортаж о тех событиях внешнего мира, которые мы воспринимаем с помощью органов чувств.

ПРИ КАЖДОМ МОРГАНИИ МОЗГ КАК БЫ ОТКЛЮЧАЕТ ВХОДНОЙ ЗРИТЕЛЬНЫЙ СИГНАЛ. МЫ ЭТОГО НЕ ЗАМЕЧАЕМ, ПОСКОЛЬКУ МОЗГ ЗАПОЛНЯЕТ ПРОБЕЛЫ, СШИВАЯ КАДРЫ ДО И ПОСЛЕ ЗАКРЫТИЯ ГЛАЗ. ПО НЕКОТОРЫМ ОЦЕНКАМ ИЗ-ЗА САККАД И МОРГАНИЯ ЗА СУТКИ ЧЕЛОВЕК ТЕРЯЕТ ЦЕЛЫЙ ЧАС ЗРИТЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ, НО ПРИ ЭТОМ В НАШЕМ ОСОЗНАНИИ ЗРИТЕЛЬНЫХ ОБРАЗОВ НЕТ НИКАКИХ ПРОБЕЛОВ.

Осознанное восприятие реальности, на самом деле, это очень сильно отредактированная версия реальности. Если вы будете пристально глядеть в глаза друга и попросите его двигать глазами влево и вправо, вы легко проследите за его движениями. Но если вы, пристально глядя в зеркало, сами попытаетесь двигать глазами, вы обнаружите, что следить за движением собственных глаз вы не в состоянии. Быстрые произвольные движения глаз называются саккадами, и более строгие эксперименты, чем разглядывание себя в зеркале, показывают, что во время саккад зрение частично подавляется²⁸⁰. Например, если изображение на экране вспыхивает в тот момент, когда вы переводите взгляд в другую точку, и исчезает прежде, чем прекращается движение глаз, с большой вероятностью вы не осознаете, что было на экране.

Когда дело касается осознанного восприятия, мозг часто отбрасывает то, что происходит между движениями глаз. Аналогичным образом, при каждом моргании мозг как бы отключает входной зрительный сигнал. Мы этого не замечаем, поскольку мозг заполняет пробелы, сшивая кадры до и после закрытия глаз. По некоторым оценкам из-за саккад и моргания за сутки человек теряет целый час зрительной информации, но при этом в нашем осознании зрительных образов нет никаких пробелов²⁸¹.

ПЕРЕКАЛИБРОВКА ВРЕМЕНИ

Гром и молния – результаты одного и того же события, но при определенных обстоятельствах мы воспринимаем их раздельно, поскольку скорость света почти в миллион раз больше скорости звука. Звук грома достигает наших ушей значительно позже, чем фотоны света от молнии достигают наших глаз. Однако при других обстоятельствах мозг может не только параллельно обрабатывать зрительные и акустические сигналы, но и пытаться выровнять и синхронизировать сигналы от этих важнейших органов чувств.

Я уже приводил пример с тарелками в оркестре: световой и акустический сигналы достигают наших органов чувств в разное время, но они воспринимаются как последствия одного и того же явления. Вид и звук соударяющихся тарелок соединяются в единый мультимедийный опыт до того, как «допускаются» до сознания. То же самое происходит с речью. Когда кто-то произносит слово «мама», мы видим, как губы говорящего раскрываются сначала с первым, а потом со вторым слогом «ма». Однако звук речи и вид движущихся губ попадают в уши и в глаза в разное время. Разница во времени может быть довольно значительной: в большой ауди-

²⁸⁰ Burr et al., 1994; Yarrow et al., 2001.

²⁸¹ Koch, 2004.

тории звук голоса профессора доходит до задних рядов слушателей примерно за 50 мс. Аналогичным образом звук биты, ударяющей по бейсбольному мячу, доходит до игрока, находящегося между второй и третьей базой, примерно через 100 мс. Но мы обычно воспринимаем речь и движение губ говорящего (или звук и вид удара) как проявления одного и того же события.

Можно предположить, что мы не регистрируем задержку между поступлением зрительной и акустической информации по той причине, что разрешающая способность мозга не позволяет выявить разницу в 50 или 100 мс. Но это не так. После тренировки люди могут зарегистрировать расхождение во времени поступления двух звуков разной частоты, составляющее всего 20 мс²⁸². Мы не осознаем расхождение во времени поступления зрительного и акустического сигналов по той причине, что мозг неосознанно поставляет нашему сознанию интегральную интерпретацию событий.

Отрезок времени, на протяжении которого мозг интегрирует звуковую и зрительную информацию в единый образ называют *временным окном интеграции*. Внутри этого окна мозг считает звуковые и зрительные сигналы одновременными. Для речи это окно может составлять порядка 100 мс: например, если между изображением и звуком в фильме есть несовпадение во времени менее 100 мс, мы обычно не обращаем на это внимания. Однако это окно несимметрично. Если звуковой сигнал *предшествует* зрительному сигналу на 50 мс, мы можем заметить какую-то странность, но если звуковой сигнал задерживается на 50 мс по отношению к зрительному сигналу, мы ничего не заметим²⁸³.

Еще одно доказательство того, что мозг активно пытается синхронизировать зрительные и звуковые сигналы, заключается в том, что временное окно интеграции не является заданным раз и навсегда – это не результат задержки обработки визуальной информации (визуальная информация прибывает в кору медленнее, чем звуковая, поскольку глаз работает медленнее уха)²⁸⁴; это адаптивный параметр. Если человеку показывать несколько сотен световых вспышек, *после которых* через 200 мс каждый раз следует звуковой сигнал, человек начинает воспринимать звуковые и световые сигналы, разделенные интервалом всего в 20 мс, как одновременные. Однако та же пара сигналов не обязательно воспринимается одновременно, если предварительно человека тренировали на сотне световых вспышек, которым *предшествовал* звуковой сигнал. Другими словами, после длительного воздействия парных сигналов с большим промежутком между визуальным и звуковым сигналом можно сдвинуть или расширить временное окно интеграции, и это подтверждает относительность субъективного ощущения одновременности сигналов. Основываясь на предыдущем опыте, мозг создает картину, в которой визуальный и звуковой сигналы сливаются в одно событие²⁸⁵.

Возможно, наиболее интересное проявление того, как сознание отражает порядок реальных событий, заключается в том, что более поздние сенсорные сигналы могут влиять на осознанное восприятие более ранних сигналов. Речь – яркий тому пример. Представьте себе, что слышите две фразы: «Мышь сломалась» и «Мышь умерла». Смысл слова «мышь» становится ясен только в конце предложения. Вам не сразу ясно, идет ли речь о компьютерной мыши или о грызуне, и поэтому для интерпретации предложения нужно дождаться его окончания.

Этот стандартный пример *обратного редактирования* можно сравнить с так называемой «иллюзией кролика». Представьте себе, что кто-то быстрым движением дважды хлопывает

²⁸² Kanabus et al., 2002; Alais and Cass, 2010.

²⁸³ Van Wassenhove et al., 2007; Mégevand et al., 2013. Есть и другой фактор, определяющий разницу скорости обработки слуховой и зрительной информации (визуальные образы формируются медленнее слуховых), но я не буду на этом останавливаться подробно.

²⁸⁴ Я слегка упрощил ситуацию. В реальности система обработки зрительной информации изначально запаздывает. Зрительная информация от сетчатки может поступать в зрительную кору через 50 мс после того, как слуховая информация от улитки уха поступает в слуховую кору. Главным образом, эта задержка связана с тем, что преобразование фотохимического сигнала в сетчатке глаза происходит гораздо медленнее, чем преобразование механического сигнала в улитке уха.

²⁸⁵ Fujisaki et al., 2004; Toida et al., 2014; Van der Burg et al., 2015.

вас по запястью, а вслед за этим тоже дважды у локтевого сгиба. В этом эксперименте люди часто испытывают то, чего на самом деле не было. Многие чувствуют не прикосновения у запястья и локтя, а испытывают ощущение, будто маленький кролик совершил легкие прыжки по всей длине руки на участке от запястья до локтя²⁸⁶. Если кто-то хлопает вас дважды у запястья и на этом остановится, вы почувствуете два хлопка. Но при иллюзии кролика третий и четвертый хлопки изменяют восприятие места второго хлопка. Вывод таков, что локализация позднего стимула влияет на восприятие локализации предыдущих стимулов. Таким образом, сознание не может непрерывно отражать ход времени. Скорее, мозг неосознанно и непрерывно обрабатывает входные сигналы, но передает отредактированный отчет сознанию только после получения важнейших связующих элементов²⁸⁷.

АКТИВНОСТЬ МОЗГА И СОЗНАНИЕ

Мы не знаем, как мозг решает эти временные задачи, и мы совсем не понимаем, как формируется сознание. Однако в идентификации некоторых корреляций между активностью нейронов и сознанием наметился прогресс²⁸⁸. Типичные эксперименты проводят с помощью электроэнцефалографа, который регистрирует слабые электрические сигналы, посылаемые корой головного мозга. Одна из стратегий поиска корреляций между активностью нейронов и сознанием заключается в сравнении электрической активности, возникающей под действием осознанно воспринимаемого стимула, с электрической активностью, возникающей под действием сублимinalного (подпорогового) сигнала, который воспринимается мозгом, но не передается сознанию.

Исследователи могут установить порог осознанного восприятия путем создания в одном из квадрантов экрана вспыхивающего изображения, такого как наклонная линия, длительностью менее 100 мс. В одном исследовании участников эксперимента просили указать, в какой части экрана, как им кажется, возникало изображение, и спрашивали, видели ли они линию на самом деле – т. е. было ли это осознанное восприятие или только догадка. Если люди не видели линию, а лишь догадывались о ее появлении, они должны были давать правильный ответ лишь в 25% случаев. Однако интересно, что участники эксперимента давали правильный ответ гораздо чаще, а это означает, что мозг неосознанно замечал сигнал, но не передавал эту информацию разуму.

Вопрос звучит так: чем отличаются процессы в мозге в ситуации, когда люди отвечали правильно и видели сигнал (правильно/осознанно), и в ситуации, когда люди отвечали правильно, но сообщали, что сигнала не видели (правильно/неосознанно)?

В первые 250 мс после сигнала электрическая активность мозга в случаях правильно/осознанно и правильно/неосознанно была одинаковой: никакой ощутимой разницы в деятельности мозга при осознанном и неосознанном восприятии зафиксировано не было. Однако примерно через 300 мс после сигнала при осознанном восприятии сигнала наблюдалось отчетливое усиление активности нейронов коры²⁸⁹.

Эти и многие другие исследования позволяют предположить, что механизмы работы нейронов, обеспечивающие осознанное восприятие стимулов, включаются намного позже, чем мозг фиксирует сигнал. Французский нейробиолог Станислас Деан объясняет: «Мало того, что мы осознанно воспринимаем лишь очень малую долю бомбардирующих нас сенсорных сигналов, но когда мы это делаем, это происходит с задержкой не менее трети секунды... Инфор-

²⁸⁶ Geldard and Sherrick, 1972; Kilgard and Merzenich, 1995; Goldreich and Tong, 2013.

²⁸⁷ Dennett, 1991; Buonomano, 2011; Herzog et al., 2016.

²⁸⁸ См., например, Dehaene and Changeux, 2011; Kandel, 2013.

²⁸⁹ Lamy et al., 2009. См. также Salti et al., 2015.

мация, которую мы считаем осознанным «настоящим», является устаревшей как минимум на треть секунды. Длительность этого лаг-периода может даже превышать полсекунды, если сигнал настолько слаб, что для преодоления порога осознанного восприятия требуется медленное накопление доказательств»²⁹⁰.

Вывод таков, что сознание не только с задержкой дает отчет о событиях, происходящих во внешнем мире, но задержка эта может иметь разную длительность. Если вы услышите крик «Огонь!», вероятно, его смысл дойдет до сознания достаточно быстро, поскольку бессознательный мозг быстро найдет соответствующий комментарий и отошлет его сознанию. Но если вы слышите выражение «крыша поехала» или «крыша дома», бессознательный мозг, по-видимому, дожидается недвусмысленной интерпретации слова «крыша» и лишь потом отправляет информацию сознанию.

Мозг разрезает, прерывает и достраивает реальность, прежде чем отправить разуму соответствующий отчет о происходящих вокруг нас событиях. Но если мы перестанем об этом думать, нам по-прежнему будет казаться, что наш сознательный опыт отражает непрерывно развивающуюся реальность.

ВРЕМЯ И СВОБОДА ВОЛИ

Про понятие *свободы воли*, как и про понятие *времени*, можно сказать словами Святого Августина: «Я знаю, что это такое. Но если я попытаюсь объяснить тому, кто спрашивает, я не смогу этого сделать».

Если в лесу падает дерево, но рядом нет никого, кто мог бы это услышать, возникает ли звук от падения? Проблема заключается в неопределенности смысла слова «звук»: если мы определим *звук* как колебание молекул воздуха, падающее дерево производит звук, но если для нас звук – это осознанное восприятие человеком колебания молекул воздуха, то в данном контексте ответ на вопрос будет отрицательным.

Так вот проблема существования свободы воли тоже связана с неопределенностью определения *свободы воли*²⁹¹. Оксфордский словарь английского языка дает такое определение: «Способность индивидуума делать свободный выбор, не predetermined божественным промыслом, физическими законами причинности, судьбой и т. д.»²⁹² Возможно, именно такое определение свободы воли даст большинство людей, но с научной точки зрения это негодное определение, поскольку если под «физическими законами причинности» понимаются законы физики, остается предположить, что свобода воли – продукт какой-то не поддающейся описанию субстанции или некое подобие души. Нейробиолог Рид Монтегю именно это и подметил: «Идея свободы воли – близкий родственник идеи души: эта концепция предполагает, что ваша личность, ваши мысли и чувства происходят из некоей сущности, отличающейся от физических сущностей, составляющих ваше тело»²⁹³. Но если придерживаться этого определения, мы сможем разрешить парадокс: нет, свободы воли не существует, поскольку концепция души – порождение человеческого разума, а не его источник.

ДЛЯ ТЕХ, КТО СЧИТАЕТ, ЧТО МЫ ЖИВЕМ В ЧЕТЫРЕХМЕРНОМ «БЛОКЕ ВСЕЛЕННОЙ», ВОПРОС О ТОМ, ЯВЛЯЮТСЯ ЛИ

²⁹⁰ Dehaene, 2014, 126. Другие примеры того, как манипуляции, совершаемые через 400 мс после стимула, могут влиять на восприятие стимула: Scharnowski et al., 2009; Sergent et al., 2013.

²⁹¹ Философский вопрос о свободе воли имеет долгую историю, а относительно недавно им стали заниматься и нейробиологи. В качестве введения в эту тематику рекомендуем следующие источники: Montague, 2008; Haggard, 2011; Nichols, 2011; Smith, 2011; and books: Dennett, 2003; Harris, 2012.

²⁹² Definition #2, <http://www.oed.com/view/Entry/74438> (12/30/2015).

²⁹³ Montague, 2008.

ЗАКОНЫ ФИЗИКИ ДЕТЕРМИНИСТСКИМИ ИЛИ НЕТ, ИМЕЕТ ВТОРОСТЕПЕННОЕ ЗНАЧЕНИЕ, ПОСКОЛЬКУ САМ ПО СЕБЕ «БЛОК ВСЕЛЕННОЙ» ИСКЛЮЧАЕТ СУЩЕСТВОВАНИЕ СВОБОДЫ ВОЛИ. ЕСЛИ В ТАКОЙ ВСЕЛЕННОЙ СОСУЩЕСТВУЮТ ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ И БУДУЩЕЕ, ЛЮБОЙ ВЫБОР, КОТОРЫЙ ПРЕДСТОИТ СДЕЛАТЬ, «УЖЕ» СДЕЛАН.

Менее строгие определения свободы воли звучат примерно так: *способность выбирать между разными способами действия или способность действовать без посторонних советов или принуждения*. Но это безнадежно расплывчатые определения: они не дают понять, является ли выбор осознанным, и на их основании можно заключить, что компьютер, обыгрывающий меня в шахматы, проявляет свободу воли.

Более полезны такие определения, в которых свобода воли связывается с непредсказуемостью. Например, Стивен Хокинг писал: «Мы можем говорить о свободе воли людей по той причине, что не можем предсказать, что они будут делать»²⁹⁴. А по мнению Роджера Пенроуза, «вопрос о свободе воли связан с детерминизмом»²⁹⁵.

Другими словами, если законы физики гласят, что можно предсказать состояние системы (включая человеческий мозг) в момент времени t , исходя из ее состояния в предыдущие моменты времени, следовательно, свободы воли не существует. Философ Майкл Локвуд объясняет: «Широко распространено мнение, что универсальный детерминизм не согласуется с возможностью свободы воли. Идея универсального детерминизма заключается в том, что вселенной управляет ряд строгих законов, которые определяют состояние вселенной в любой следующий момент времени, исходя из ее состояния в предыдущий момент времени. Если вселенная действительно детерминирована таким образом, следовательно ... любое следующее событие, включая наш выбор и действия, тоже определены заранее»²⁹⁶.

МЫ МОЖЕМ СПОРИТЬ, «СВОБОДНЫ» ЛИ МЫ В ВЫБОРЕ ИЛИ НЕТ, НО СХОДИМСЯ В ТОМ, ЧТО ЧУВСТВУЕМ СЕБЯ СВОБОДНЫМИ В СОВЕРШЕНИИ ВЫБОРА. ПО ЭТОЙ ПРИЧИНЕ, ВОЗМОЖНО, СВОБОДУ ВОЛИ И СЛЕДУЕТ ОПРЕДЕЛИТЬ КАК ОЩУЩЕНИЕ?

Противоречия возникают в контексте квантовой механики, поскольку, в отличие от всех других разделов физики, оперирующих достоверными величинами, квантовая механика оперирует вероятностями. Мы знаем, что на каком-то уровне квантовые события воздействуют на состояние мозга: например, каждый фотон, детектируемый (или не детектируемый) сетчаткой, ведет себя в соответствии с законами квантовой механики. Так что, даже в теории, поведение человека невозможно предсказать с точностью 100%. Тем не менее квантовая механика представляет некий вариант вероятностного детерминизма: она определяет возможные события и соответствующие вероятности и, по мнению многих философов, оставляет мало места для проявления свободы воли.

Но для тех, кто считает, что мы живем в четырехмерном «блоке вселенной», вопрос о том, являются ли законы физики детерминистскими или нет, имеет второстепенное значение, поскольку сам по себе «блок вселенной» исключает существование свободы воли. Если в такой вселенной сосуществуют прошлое, настоящее и будущее, любой выбор, который предстоит сделать, «уже» сделан.

Все приведенные выше определения свободы воли оставляют в стороне один важный аспект проблемы: как быть с нашим ощущением, что мы контролируем собственный выбор?

²⁹⁴ Hawking, 1996.

²⁹⁵ Penrose, 1989, 558.

²⁹⁶ Lockwood, 2005.

Мы можем спорить, «свободны» ли мы в выборе или нет, но сходимся в том, что чувствуем себя свободными в совершении выбора²⁹⁷. По этой причине, свободу воли и следует определить как ощущение?

Как писал психолог Дэниел Вегнер в начале 2000-х гг., свобода воли – это «всего лишь ощущение человека. Оно имеет к действию такое же отношение, как ощущение боли – к изменениям в организме, возникающим в результате болевого воздействия»²⁹⁸.

Свободу воли и раньше определяли как проявление сознания, связанного с процессами в нейронах, которые отвечают за принятие решений. Почти 300 лет назад философ Дэвид Юм писал: «Под волей я понимаю не что иное, как всего лишь осознанное внутреннее ощущение, которое возникает, когда мы намеренно совершаем какое-то новое движение тела или мысли»²⁹⁹. Томас Хаксли также полагал, что «ощущение, которое мы можем назвать волей, является не причиной намеренного действия, но символом состояния мозга, которое и является непосредственной причиной действия. Мы – сознательные автоматы, снабженные свободой воли лишь в этом понятном смысле данного термина, которым так часто злоупотребляют»³⁰⁰.

ПРЕДСКАЗУЕМЫ ЛИ ЛЮДИ?

Если мы соглашаемся определять свободу воли как ощущение, которое возникает у нас после того, как мозг принимает решение (т. е. после того, как неосознаваемый нами процесс в нервных клетках мозга приводит к принятию решения), должен существовать способ выявлять соответствующую активность нейронов еще до того, как человек осознает, что решение принято. И многочисленные исследования показывают, что это действительно так.

Эксперименты такого типа стали возможны благодаря развитию одного стандартного метода лечения больных с тяжелой формой эпилепсии. Пациентам с тяжелой формой эпилепсии иногда делают хирургическую операцию, заключающуюся в удалении той части мозга, которая отвечает за возникновение эпилептических приступов. Чтобы точно локализовать этот участок мозга, нейрохирурги имплантируют в мозг электроды и ожидают приступа. Регистрируя активность нейронов в процессе приступа, они могут локализовать зону патологии.

Пациенты, которым вживили электроды, часто соглашаются участвовать в различных научных экспериментах. Нейрохирург Ицхак Фрайд из Университета Лос-Анджелеса вживлял электроды в участок лобной доли, называемый *дополнительной моторной областью*. Пациентов просили выполнять очень простую задачу – реализовывать свою «свободу воли» путем нажатия на кнопки клавиатуры в любой момент, когда им заблагорассудится. Непосредственно перед нажатием на кнопку наблюдалось изменение активности многих нейронов. На основании активности популяций нейронов можно было с 80% вероятностью предсказать, что человек собирается двинуть пальцем, еще за 900 мс до того момента, как человек действительно это делал (и за 700 мс до того момента, когда человек осознавал, что собирается это сделать)³⁰¹.

Заметьте, 900 мс – более чем достаточно, чтобы мозг мог заставить палец пошевелиться. Например, если вас просят нажать на кнопку, как только вы увидите вспышку света, промежуток времени между вспышкой и нажатием на кнопку составляет около 300 мс. Из этих данных следует, что экспериментаторы знали о том, что человек собирается нажать на кнопку, раньше,

²⁹⁷ Хотя утверждается, что ощущение выбора – лишь иллюзия, рассыпающаяся при более внимательном анализе (Harris, 2012).

²⁹⁸ Wegner, 2002.

²⁹⁹ Hume, 1739/2000.

³⁰⁰ Huxley, 1894/1911, 244.

³⁰¹ Fried et al., 2011.

чем сам человек это осознавал. В ряде подобного рода экспериментов было подтверждено, что при некоторых обстоятельствах за несколько сотен миллисекунд или даже целых секунд до совершения человеком или животным какого-то действия можно предсказать, что действие будет совершено³⁰².

Однако эти данные не обязательно должны означать, что поведение человека точно предсказуемо на основании характера активности нейронов, или что сознание не имеет отношения к принятию решений. В данных экспериментах речь шла о чрезвычайно простых решениях. Решение двинуть пальцем нельзя сравнивать с решением принять или не принять предлагаемую работу. Так что, возможно, выбор момента для движения пальцем осуществляется в неосознанном процессе, запускающем осознанное ощущение «свободы воли», тогда как решение пациента участвовать в эксперименте, по-видимому, зависит как от неосознанных, так и осознанных процессов в сетях нейронов.

Как происходит процесс нажатия на кнопку клавиатуры? Произвольное нажатие на кнопку совершается в результате сокращения мышц пальца, которое происходит в результате серии потенциалов действия, перемещающихся вдоль срединного нерва. Потенциал действия возникает при активации двигательных нейронов на уровне шейного отдела спинного мозга, что, в свою очередь, является результатом активности нейронов двигательной зоны коры, отвечающей за движение рук. Но что заставляет возбуждаться нейроны двигательной коры?

Тут все довольно сложно, но суть такова: запуск активности любого нейрона обычно требует подъема активности нейронов, имеющих с данным нейроном синаптическую связь (его пресинаптических партнеров). Если говорить в общих чертах, этот подъем активности может выражаться в том, что многие пресинаптические нейроны возбуждаются на короткое время – порядка нескольких миллисекунд (так называемое *пространственное суммирование*: как будто бочку быстро заполняют водой, одновременно выливая в нее несколько ведер воды), или в том, что несколько пресинаптических нейронов остаются в возбужденном состоянии более длительное время – порядка десятков миллисекунд или дольше (так называемое *временное суммирование*: как будто бочку постепенно наполняют водой из шланга).

В любом случае этот процесс можно рассматривать как *постепенное накопление стимулов* к принятию определенного решения: вы можете решиться посмотреть фильм, поскольку многие ваши друзья вам советовали (пространственное суммирование), или поскольку один ваш друг, которому вы очень доверяете, настойчиво рекомендовал вам это сделать (временное суммирование).

В этом контексте стоит упомянуть еще один аспект действия нейронов, заключающийся в том, что они создают множество «помех»: сила их активности самопроизвольно меняется, увеличиваясь и уменьшаясь без очевидных причин (причины, безусловно, существуют, однако мы относим такие колебания к случайным фоновым помехам). Принятие простого решения о том, нажать или не нажать на кнопку, можно рассматривать как «соревнование» между двумя группами нейронов.

**ТО, ЧТО МЫ ВОСПРИНИМАЕМ В КАЧЕСТВЕ СВОБОДНОГО
ВОЛЕИЗЪЯВЛЕНИЯ, ПО-ВИДИМОМУ, ЯВЛЯЕТСЯ РЕЗУЛЬТАТОМ
НЕОСОЗНАВАЕМОЙ НАМИ РАБОТЫ НЕЙРОНОВ, ОТВЕТСТВЕННЫХ
ЗА ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ.**

Скажем, одна группа нейронов двигательной зоны коры отвечает за то, чтобы опустить палец на кнопку, а другая – за то, чтобы его поднять. Одна группа может начать действовать быстрее в результате случайных флуктуаций, и в каждом конкретном эксперименте «волевое решение» нажать или не нажать может запуститься в результате неосознанных и случай-

³⁰² Libet et al., 1983; Lau et al., 2007; Haggard, 2008; Soon et al., 2008; Murakami et al., 2014.

ных флуктуаций активности специфических сетей нейронов головного мозга. Когда какая-то группа нейронов выигрывает соревнование, мы совершаем соответствующее действие, и у нас возникает ощущение, что мы проявили «свободу воли». Одно из объяснений, как исследователи могут предсказать движение пальца человека за сотни миллисекунд до совершения движения, заключается в том, что они видят, какая группа нейронов первой рванула со старта.

Пока еще слишком рано делать какие-то выводы из нейрофизиологического анализа свободы воли, однако в данной области исследований, традиционно лишенной экспериментального материала, подобные исследования открывают новые пути для обсуждения проблемы. Как суммирует нейробиолог Патрик Хаггард, все более широкую поддержку получает мнение, что «хотя мы чувствуем, что наши поступки являются результатом наших осознанных решений и мыслей, на самом деле, это чувство основано на проявлениях активности мозга в тех областях, которые контролируют произвольные движения»³⁰³. То, что мы воспринимаем в качестве свободного волеизъявления, повидимому, является результатом неосознаваемой нами работы нейронов, ответственных за принятие решений. Вообще говоря, трудно себе представить, чтобы дело обстояло как-то иначе. Вся известная нам о мозге информация свидетельствует в пользу того, что все состояния разума определяются характером активности нейронов мозга, и любая конкретная картина активности нейронов вытекает из предыдущего состояния нейронов (как активного, так и скрытого; см. главу 6), действующего сигнала и случайных флуктуаций, происходящих на термодинамическом и квантовом уровне.

ВСЯ ИЗВЕСТНАЯ НАМ О МОЗГЕ ИНФОРМАЦИЯ
СВИДЕТЕЛЬСТВУЕТ В ПОЛЬЗУ ТОГО, ЧТО ВСЕ СОСТОЯНИЯ
РАЗУМА ОПРЕДЕЛЯЮТСЯ ХАРАКТЕРОМ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ
МОЗГА, И ЛЮБАЯ КОНКРЕТНАЯ КАРТИНА АКТИВНОСТИ
НЕЙРОНОВ ВЫТЕКАЕТ ИЗ ПРЕДЫДУЩЕГО СОСТОЯНИЯ НЕЙРОНОВ,
ДЕЙСТВУЮЩЕГО СИГНАЛА И СЛУЧАЙНЫХ ФЛУКТУАЦИЙ,
ПРОИСХОДЯЩИХ НА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОМ И КВАНТОВОМ
УРОВНЕ.

Возможно, вам нелегко согласиться с тем, что свобода воли – лишь ощущение, возникающее после неосознанного принятия решения нейронами мозга. Некоторые считают, что если дела обстоят именно так, сознание бессмысленно, как пассажир на заднем сиденье автомобиля, который только наблюдает, но не контролирует ситуацию³⁰⁴. Однако даже если сознание, как и ощущение свободы воли, лишь плод разума, это не означает, что оно не играет никакой роли в принятии решений!

Если вы идете на свидание с незнакомым человеком, и во время ужина ваш партнер неожиданно хватается вилку и втыкает ее вам в руку, ваше мгновенное ответное движение, вероятно, слишком стремительно, чтобы быть осознанным, и, скорее всего, не зависит от осознанного чувства боли. Однако осознанное чувство боли наверняка повлияет на ваше последующее решение, а именно, идти на вторую встречу или нет. В эволюционном плане субъективный опыт и ощущение свободы воли могли быть полезны для планирования будущего. Например, возможно, именно ощущение свободы воли убеждает нас в том, что мы сами контролируем свою судьбу и в состоянии планировать собственное будущее в долгосрочном плане, что необходимо для выживания.

³⁰³ Haggard, 2011.

³⁰⁴ Dehaene, 2014, 91. Писатель Адам Гопник отразил эту идею через сравнение с выступлением представителя Белого дома: «То, что мы называем сознанием, – лишь иллюзия, которая имеет такое же реальное отношение к работе нашего мозга, как представитель Белого дома к работе администрации Буша: он находит рациональные и систематические объяснения решениям, принятым неясными и скрытыми силами, чьи обиды и иррациональные задачи осознаются намного позже произошедших событий». *The New Yorker*, July 4, 2005.

ПРЕСТУПЛЕНИЕ И НАКАЗАНИЕ

Вопрос о существовании свободы воли занимает центральное место в сфере моральной ответственности и в юриспруденции³⁰⁵. Некоторые полагают, что если наши решения вытекают из детерминированных и неосознанных процессов в сетях нейронов, мы не можем отвечать за собственные действия: другими словами, детерминизм несовместим с моральной ответственностью.

Например, физик и сторонник теории эволюционирующего «блока вселенной» (в которой прошлое встроено в фиксированную четырехмерную систему пространства-времени, а будущего не существует) Джордж Эллис полагает, что этернализм противоречит представлениям о моральной ответственности: «Если мы всего лишь машины, живущие в условиях, когда будущее уже предрешено, следовательно, Адольф Гитлер не имел другой возможности, как сделать то, что он сделал. . . Для меня такая позиция неприемлема, поскольку ведет к чудовищной ситуации, когда люди – всего лишь пешки в мире, которым правит дьявол»³⁰⁶. Идея Эллиса подтверждается данными исследований, в которых показано, что если людям сообщают, что все наши действия являются результатом детерминированных и бессознательных процессов, они считают других людей в меньшей степени ответственными за их поступки³⁰⁷.

Давайте рассмотрим три сценария, в которых автомобилист сбивает пешехода: 1) водитель машины сбил пешехода намеренно; 2) водитель машины не справился с управлением, поскольку читал сообщение на мобильном телефоне; 3) водитель не справился с управлением в момент первого приступа эпилепсии³⁰⁸.

Поскольку все три пути развития событий можно назвать следствием сложной работы сетей нейронов в головном мозге автомобилиста, и при отсутствии того, что большинство людей называют свободой воли, можно сказать, что во всех случаях «у автомобилиста не было выбора». Однако такая точка зрения является вариантом веры в существование души, некоей формой *криптодуализма*, в рамках которого разум считают независимым от мозга.

Если я решаю проверить сообщения на телефоне, находясь за рулем машины, имеет ли значение, была ли активность нейронов, вызвавшая это решение, осознанной или неосознанной, предсказуемой или непредсказуемой, преднамеренной или непреднамеренной? Решение принято моим мозгом, то есть мной, поскольку между мной и моим мозгом нет разграничения!

Однако из этого не следует, что три вышеприведенных сценария эквивалентны во всех отношениях, или что при вынесении приговора в отношении водителя не следует принимать во внимание его психическое состояние.

Но не стоит путать вопрос о наказании с вопросом об ответственности. Во всех вышеприведенных сценариях водитель несет ответственность за совершенное действие вне зависимости от того, было ли оно осознанным или нет. Эта ситуация отражается в судебной системе: во всех трех случаях автомобилист будет признан виновным (в частности, он будет оплачивать лечение пешехода). Но наказание в этих случаях будет разным, поскольку должно учитывать целый комплекс факторов, включая преднамеренность (намерение нанести вред – вне зависимости от того, осознанным оно было или нет) и вероятность будущих рецидивов или реабилитации.

³⁰⁵ Gazzaniga and Steven, 2005; Gazzaniga, 2011.

³⁰⁶ Цитируется по статье Зейи Мерали «Завтра никогда не наступило», *Discover*, June 2015.

³⁰⁷ Nichols, 2011; Shariff and Vohs, 2014.

³⁰⁸ В рамках уголовного кодекса эти три сценария примерно расцениваются как преднамеренность, небрежность/грубая неосторожность и компенсационная ответственность.

Нейробиологи, физики, философы и судебные эксперты продолжают обсуждать вопросы, связанные с моральной ответственностью, детерминизмом и ролью осознанных и неосознанных процессов в принятии решений. Но, возможно, пришло время использовать нашу «свободу воли», чтобы признать, что свобода воли – осознанное ощущение, связанное с процессами в нейронах, которые лежат в основе принятия решений. А за эти решения мы несем полную ответственность, поскольку каждый из нас является суммой сознательных и бессознательных проявлений собственной личности.

У нас не так много столь же убедительного жизненного опыта, как ощущение ухода в прошлое *настоящего момента времени* и раскрытия бесконечных потенциальных возможностей будущего. Это ощущение настолько сильно и очевидно, что наше видение реальности плохо согласуется с концепцией этернализма. Однако противоречащее интуиции представление о том, что прошлое и будущее столь же реальны, как и настоящее, в наши дни является наиболее общепринятой гипотезой о природе времени. Впрочем, эта гипотеза «блока вселенной» тоже не лишена недостатков. Не существует единого мнения относительно природы времени, поскольку широко известно, что время может играть в законах физики разные роли.

Например, сейчас физики пытаются разрешить так называемую *проблему времени* – несоответствие между ролью времени в общей теории относительности и в квантовой механике. В общей теории относительности время (как элемент единой системы пространства-времени) может рассматриваться как часть структуры вселенной, тогда как в квантовой механике время – это параметр, управляющий эволюцией квантовой системы. Однако, удивительным образом, некоторые попытки соединить общую теорию относительности с квантовой механикой математическим путем приводят к полной потере параметра времени. Время просто исчезает из уравнений³⁰⁹, создавая ощущение, что мы, на самом деле, живем в «блоке вселенной», построенной лишь в трех пространственных измерениях.

Проблемы концепций этернализма и «блока вселенной» вытекают не только из законов физики, но и из нейробиологии. В частности, концепция «блока вселенной» не может объяснить тот факт, что мы испытываем ощущение течения времени, и подводит к заключению, что субъективное ощущение течения времени является артефактом работы мозга. Возможно ли, что такой яркий и универсальный опыт является лишь *иллюзией* в самом прямом смысле слова?

Как известно, генетик Феодосий Добжанский заметил, что «ничто в биологии не имеет смысла, кроме как в свете эволюции». Если серьезно отнестись к этому утверждению, получается, что все, что мы осознаем и не осознаем, является результатом эволюционного давления³¹⁰. Таким образом, возможно, некоторые функции мозга создают у нас субъективные ощущения, поскольку они могут давать селективные преимущества. Мы осознанно воспринимаем болевые стимулы, поскольку субъективное ощущение боли может давать преимущества по сравнению с реакциями нечувствительного к повреждениям зомби (например, защиту от будущих повреждений). Если рассуждать подобным образом, ощущение течения времени тоже должно обеспечивать селективное преимущество. Но каким может быть это преимущество, если мы живем в застывшем «блоке вселенной» этернализма?

³⁰⁹ Здесь я ссылаюсь на уравнение Уилера–Де Витта, смысл которого заключается в соединении квантовой механики и общей теории относительности. К недоумению многих, попытка такого соединения привела к созданию уравнения, в котором параметр времени вообще отсутствует, из чего может следовать, что времени не существует. Эту идею, в частности, поддерживают такие физики, как Джулиан Барбур и Карлос Ровелли. Замечательные обзоры о времени в квантовой механике и об уравнении Уилера–Де Витта: Barbour, 1999; Rovelli, 2004; Lockwood, 2005; Callender, 2010a; Smolin, 2013.

³¹⁰ Koch, 2004; Dehaene, 2014.

СЛОЖНЫЙ ВОПРОС ЗАКЛЮЧАЕТСЯ В ТОМ, НЕТ ЛИ ВРЕМЕННОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ У САМОГО СОЗНАНИЯ. ВОЗМОЖНО, СОЗНАНИЕ В КАКОЙ-ТО МЕРЕ СРОДНИ ЭВОЛЮЦИИ И ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ ПРОЦЕСС, СУЩЕСТВУЮЩИЙ ТОЛЬКО ВО ВРЕМЕНИ И НЕ СУЩЕСТВУЮЩИЙ В СТАТИЧНОМ СОСТОЯНИИ.

Еще одно несоответствие между физикой и нейробиологией заключается в том, что если течение времени – созданная мозгом иллюзия, мгновенные срезы «блока вселенной» должны согласовываться с феноменом сознания. Однако мы воспринимаем не «мгновенные снимки», а только события, разворачивающиеся на протяжении какого-то времени, выхватывая и интерпретируя значимые моменты как некое «правдоподобное настоящее».

Еще более сложный вопрос заключается в том, нет ли временной составляющей у самого сознания. Возможно, сознание в какой-то мере сродни эволюции и представляет собой процесс, существующий только во времени и не существующий в статичном состоянии.

В дискуссиях между физиками и философами, посвященных проблемам времени, следует учитывать данные нейробиологии. Необходимо определить, отражает ли наше субъективное ощущение течения времени какие-то физические явления, которые нужно объяснять в рамках физики, или представляет собой необычный субъективный опыт, не имеющий никакого отношения к реальности. Нейробиологи и психологи, в свою очередь, должны признать, что мозг по своей сути является органом, действующим во времени. Если бы кому-то понадобилось сформулировать в двух словах суть функции мозга, наилучшим определением, возможно, было бы «предвидение будущего». Мозг определяет время, создает временные образы, запоминает прошлое и снабжает нас способностью мысленно переноситься вперед во времени – и все это с целью предсказать и подготовить наше будущее.

ЕСЛИ БЫ КОМУ-ТО ПОНАДОБИЛОСЬ СФОРМУЛИРОВАТЬ В ДВУХ СЛОВАХ СУТЬ ФУНКЦИИ МОЗГА, НАИЛУЧШИМ ОПРЕДЕЛЕНИЕМ, ВОЗМОЖНО, БЫЛО БЫ «ПРЕДВИДЕНИЕ БУДУЩЕГО». МОЗГ ОПРЕДЕЛЯЕТ ВРЕМЯ, СОЗДАЕТ ВРЕМЕННЫЕ ОБРАЗЫ, ЗАПОМИНАЕТ ПРОШЛОЕ И СНАБЖАЕТ НАС СПОСОБНОСТЬЮ МЫСЛЕННО ПЕРЕНОСИТЬСЯ ВПЕРЕД ВО ВРЕМЕНИ – И ВСЕ ЭТО С ЦЕЛЮ ПРЕДСКАЗАТЬ И ПОДГОТОВИТЬ НАШЕ БУДУЩЕЕ.

Поскольку время играет столь важную роль в функционировании мозга, механизмы определения времени встроены в операционные сети мозга на самом базовом уровне – на уровне нейронов, синапсов и сетей. Нет смысла искать, какая именно часть мозга определяет время, поскольку в той или иной форме это делает большинство нейронных сетей.

Принцип множественности часов показывает, что, в отличие от рукотворных часов, отсчитывающих время в диапазоне от миллисекунд до лет, мозг снабжен разными механизмами для определения времени в разных диапазонах. Более того, даже в пределах одного диапазона разные конкретные задачи решаются с помощью разных сетей. Почему часы внутри мозга принципиально отличаются от часов, созданных с помощью мозга? Ответ отчасти заключается в различии природы элементов, использованных для создания нейронных и рукотворных часов. Часы, созданные человеком, основаны на подсчете каждого колебания осциллятора – чем быстрее колебания, тем больше импульсов для подсчета. Часы мозга не имеют такой точности и возможности оперировать в таком широком диапазоне, как цифровые элементы современных часов: нейроны не могут считать до 32 768, не говоря уже о 9 192 631 770.

ОДНАКО МЫСЛЕННЫЕ ПУТЕШЕСТВИЯ ВО ВРЕМЕНИ – НЕ ТОЛЬКО ДАР, НО И НАКАЗАНИЕ. ВГЛЯДЫВАЯСЬ В БУДУЩЕЕ, НАШИ

ПРЕДКИ, НЕСОМНЕННО, ОБНАРУЖИЛИ ТО, С ЧЕМ СПРАВИТЬСЯ НЕ МОГЛИ: СОБСТВЕННУЮ СМЕРТЬ. ЭТО ТРЕВОЖНОЕ ЗНАНИЕ, ВОЗМОЖНО, ЗАСТАВИЛО ИХ ПРОДВИГАТЬСЯ В БУДУЩЕЕ ЕЩЕ ДАЛЬШЕ И ИЗОБРЕСТИ ПУТЕШЕСТВИЕ В ЗАГРОБНЫЙ МИР.

Животные тоже умеют определять время, но уникальность *Homo sapiens* заключается в способности преодолевать прихоти природы путем планирования будущего и изменения окружающего мира в соответствии с собственными задачами. Однако мысленные путешествия во времени – не только дар, но и наказание. Вглядываясь в будущее, наши предки, несомненно, обнаружили то, с чем справиться не могли: собственную смерть. Это тревожное знание, возможно, заставило их продвигаться в будущее еще дальше и изобрести путешествие в загробный мир.

Мысленные перемещения во времени требуют сложного и сбалансированного сочетания науки и искусства: они основаны на тщательном анализе прошлого и воображении никогда не виденного. Этот баланс иногда нарушается. Порой мы слишком много мечтаем, вместо того чтобы напрямую заняться проблемами, которые в состоянии предвидеть и решить. В частности, сегодня перед нашим видом стоят долгосрочные экономические, медицинские и экологические проблемы. Но наша близорукость объяснима: умение мысленно переноситься во времени – новая в эволюционном плане способность. К счастью, как и другие когнитивные навыки, мысленное перемещение во времени совершенствуется с практикой и обучением.

Быть может, мы живем во вселенной, где по-настоящему существует только *сейчас*, а быть может, это *сейчас* столь же условно, как *здесь*. Или природа времени еще более странна и необъяснима, чем мы можем предположить? Вне зависимости от истинной природы времени у нас нет оправданий, чтобы не оттачивать нашу способность мысленно путешествовать во времени. Чтобы научиться лучше отличать невероятное от невозможного, чтобы научиться ждать долгосрочной выгоды, а не кидаться за немедленным вознаграждением, и чтобы, живя в *настоящем*, создавать такое будущее, в котором нам захотелось бы жить, когда оно станет *настоящим*.

БЛАГОДАРНОСТИ

Часовое время – всеобщий уравниватель. Каждому из нас каждый день дается 86 400 секунд. Чтобы помочь нам использовать эти секунды, написано множество книг. Психолог Филип Зимбардо считает, что частички времени, особенно так называемого свободного времени, следует воспринимать как нечто, что можно обернуть в красивую обертку и подарить людям или посвятить любимым делам. Я благодарен очень многим друзьям и коллегам, которые подарили мне свое время, поскольку без их участия этой книги не было бы.

Данная книга – результат длительного интереса к тому, как мозг определяет время; этой проблеме я посвятил значительную часть моей научной карьеры. В процессе работы мне невероятно помогла поддержка ведущих специалистов в данной области. Особую благодарность я хочу выразить Ричарду Иври, Майклу Мауку и Уоррену Меку. Также благодарю моих друзей и коллег: Доменику Буэти, Каталину Бухузи, Дженни Кулл, Мердада Джазаери, Хьюго Мершанта, Мэтта Мейтелла, Кию Нобр, Вирджинию ван Вассенхове и Беверли Райт.

Одним из вознаграждений за работу над книгой была радость от знакомства с новыми для меня сферами научных исследований. Я решился на то, чтобы слегка погрузиться в физику времени, и глубоко признателен многим физикам и философам, которые терпеливо отвечали на мои наивные вопросы о времени, теории относительности и квантовой механике. Среди них Ричард Артур, Винсент Буономано, Шон Кэрролл, Крейг Коллендер, Пер Краус, Деннис Лемкул, Терри Сейновски, Ли Смолин и особенно Харви Браун.

Безусловно, я повинен в том, что ради краткости изложения опустил или излишне упростил информацию, полученную от многих ученых. Эти недочеты являются признаком моей собственной ограниченности в качестве исследователя и писателя. По этой причине я заранее прошу извинения у специалистов, работу которых я не упомянул или не совсем точно пересказал.

Многие из моих друзей и коллег либо читали отдельные главы книги, либо просвещали меня по каким-то конкретным вопросам. Я выражаю благодарность Джуди Буономано, Крису Солвеллу, Джеку Фельдману, Дэну Голдрейху, Ясону Голдсмиту, Вишве Гудару, Сэму Харрису, Николасу Харди, Родриго Лайе, Майклу Лонгу, Хаквану Лау, Хелен Мотанис, Джо Пьерони, Карлосу Портера-Кайо, Рафаэлю Нуньесу и Алкино Сильве.

Мои собственные исследования в области изучения мозга были бы невозможны без финансовой поддержки Национального института психического здоровья и Национального научного фонда, а также департаментов нейробиологии и психологии Университета Лос-Анджелеса. Я благодарю Аннаку Харрис и моего редактора в издательстве Norton Тома Майера за их помощь и мастерство. Наконец, я благодарю мою жену Ану за все подаренное мне время.

ЛИТЕРАТУРА

- Aasland, W. A., Baum, S. R. (2003). Temporal parameters as cues to phrasal boundaries: A comparison of processing by left- and right-hemisphere brain-damaged individuals. *Brain and Language*, 87, 385–399.
- Abbott, L. F., Nelson, S. B. (2000). Synaptic plasticity: Taming the beast. *Nature Neuroscience*, 3, 1178–1183.
- Alais, D., Cass, J. (2010). Multisensory perceptual learning of temporal order: Audiovisual learning transfers to vision but not audition. *PLoS ONE*, 5, e11283. – Arstila, V. (2012). Time slows down during accidents. *Frontiers in Psychology*, 3, 196.
- Aschoff, J. (1985). On the perception of time during prolonged temporal isolation. *Human Neurobiology*, 4, 41–52.
- Atakan, Z., Morrison, P., Bossong, M. G., Martin-Santos, R., Crippa, J. A. (2012). The effect of cannabis on perception of time: A critical review. *Current Pharmaceutical Design*, 18, 4915–4922.
- Atance, C. M., O’Neill, D. K. (2001). Episodic future thinking. *Trends in Cognitive Sciences*, 5, 533–539.
- Baker, R., Gent, T. C., Yang, Q., Parker, S., Vyssotski, A. L., Wisden, W., Brickley, S. G., Franks, N. P. (2014). Altered activity in the central medial thalamus precedes changes in the neocortex during transitions into both sleep and propofol anesthesia. *Journal of Neuroscience*, 34, 13326–13335.
- Barbour, J. (1999). *The end of time: The next revolution in physics*. New York: Oxford University Press.
- Bargiello, T. A., Jackson, F. R., Young, M. W. (1984). Restoration of circadian behavioural rhythms by gene transfer in *Drosophila*. *Nature*, 312, 752–754.
- Beaulieu, C., Kisvarday, Z., Somogyi, P., Cynader, M., Cowey, A. (1992). Quantitative distribution of GABA-immunopositive and-immunonegative neurons and synapses in the monkey striate cortex (area 17). *Cerebral Cortex*, 2, 295–309.
- Bender, A., Beller, S. (2014). Mapping spatial frames of reference onto time: A review of theoretical accounts and empirical findings. *Cognition*, 132, 342–382.
- Benoit, R. G., Schacter, D. L. (2015). Specifying the core network supporting episodic simulation and episodic memory by activation likelihood estimation. *Neuropsychologia*, 75, 450–457.
- Bhardwaj, R. D., Curtis, M. A., Spalding, K. L., Buchholz, B. A., Fink, D., Björk-Eriksson, T., Nordborg, C., Gage, F. H., Druid, H., Eriksson, P. S., Frisén, J. (2006). Neocortical neurogenesis in humans is restricted to development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103, 12564–12568.
- Bi, G. Q., Poo, M. M. (1998). Synaptic modifications in cultured hippocampal neurons: dependence on spike timing, synaptic strength, and postsynaptic cell type. *Journal of Neuroscience*, 18, 10464–10472.
- Block, R. A., Hancock, P. A., Zakay, D. (2010). How cognitive load affects duration judgments: A meta-analytic review. *Acta Psychologica*, 134, 330–343.
- Bloom, B. J., Nicholson, T. L., Williams, J. R., Campbell, S. L., Bishof, M., Zhang, X., Zhang, W., Bromley, S. L., Ye, J. (2014). An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10⁻¹⁸ level. *Nature*, advance online publication.
- Born, J., Hansen, K., Marshall, L., Molle, M., Fehm, H. L. (1999). Timing the end of nocturnal sleep. *Nature*, 397, 29–30.
- Boroditsky, L., Ramscar, M. (2002). The roles of body and mind in abstract thought. *Psychological Science*, 13, 185–189.

- Botzung, A., Denkova, E., Manning, L. (2008). Experiencing past and future personal events: Functional neuroimaging evidence on the neural bases of mental time travel. *Brain and Cognition*, 66, 202–212.
- Bourjade, M., Call, J., Pele, M., Maumy, M., Dufour, V. (2014). Bonobos and orangutans, but not chimpanzees, flexibly plan for the future in a token-exchange task. *Animal Cognition*, 17, 1329–1340.
- Bray, S., Rangel, A., Shimojo, S., Balleine, B., O'Doherty, J. P. (2008). The neural mechanisms underlying the influence of pavlovian cues on human decision making. *Journal of Neuroscience*, 28, 5861–5866.
- Bregman, A. S. (1990). Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound. Cambridge: MIT Press.
- Breitenstein, C., Van Lancker, D., Daum, I. (2001a). The contribution of speech rate and pitch variation to the perception of vocal emotions in a German and an American sample. *Cognition and Emotion*, 15, 57–79.
- Breitenstein, C., Van Lancker, D., Daum, I., Waters, C. H. (2001b). Impaired perception of vocal emotions in Parkinson's disease: influence of speech time processing and executive functioning. *Brain and Cognition*, 45, 277–314.
- Brown, H. (2005). Physical relativity: space-time structure from a dynamical perspective. Oxford: Oxford University Press.
- Brownell, H. H., Gardner, H. (1988). Neuropsychological insights into humour. In: Laughing matters: A serious look at humour. (Durant, J., Miller, J., eds). Essex: Longman Scientific & Technical.
- Buckhout, R., Fox, P., Rabinowitz, M. (1989). Estimating the duration of an earthquake: Some shaky field observations. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 27, 375–378.
- Buckley, R. (2014). Slow time perception can be learned. *Frontiers in Psychology*, 5.
- Bueti, D., Walsh, V. (2009). The parietal cortex and the representation of time, space, number and other magnitudes. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 364, 1831–1840.
- Bueti, D., Buonomano, D. V. (2014). Temporal perceptual learning. *Timing and Time Perception*, 2, 261–289.
- Bueti, D., Lasaponara, S., Cercignani, M., Macaluso, E. (2012). Learning about time: Plastic changes and interindividual brain differences. *Neuron*, 75, 725–737.
- Buhusi, C. V., Meck, W. H. (2005). What makes us tick? Functional and neural mechanisms of interval timing. *Nature Reviews Neuroscience*, 6, 755–765.
- Buonomano, D. V. (2000). Decoding temporal information: a model based on short-term synaptic plasticity. *Journal of Neuroscience*, 20, 1129–1141.
- Buonomano, D. V. (2011). Brain bugs: How the brain's flaws shape our lives. New York: W. W. Norton.
- Buonomano, D. V., Mauk, M. D. (1994). Neural network model of the cerebellum: temporal discrimination and the timing of motor responses. *Neural Computation*, 6, 38–55.
- Buonomano, D. V., Merzenic, M. M. (1995). Temporal information transformed into a spatial code by a neural network with realistic properties. *Science*, 267, 1028–1030.
- Buonomano, D. V., Maass, W. (2009). State-dependent computations: Spatio-temporal processing in cortical networks. *Nature Reviews Neuroscience*, 10, 113–125.
- Burr, D. C., Morrone, M. C., Ross, J. (1994). Selective suppression of the magnocellular visual pathway during saccadic eye movements. *Nature*, 371, 511–513.
- Cahill, L., McGaugh, J. L. (1996). Modulation of memory storage. *Current Opinion in Neurobiology*, 6, 237–242.

- Cai, Z. G., Wang, R. (2014). Numerical magnitude affects temporal memories but not time encoding. *PLoS ONE*, 9, e83159.
- Cajochen, C., Altanay-Ekici, S., Münch, M., Frey, S., Knoblauch, V., Wirz-Justice, A. (2013). Evidence that the lunar cycle influences human sleep. *Current Biology*, 23, 1485–1488.
- Calaprice, A. (2005). The new quotable Einstein. Princeton: Princeton University Press.
- Callender, C. (2010a). Is time an illusion? *Scientific American*, June, 59–65.
- Callender, C., Edney, R. (2010b). Introducing time: A graphic guide. London: Icon Books.
- Campbell, L. A., Bryant, R. A. (2007). How time flies: A study of novice skydivers. *Behaviour Research and Therapy*, 45, 1389–1392.
- Carlson, B. A. (2009). Temporal-pattern recognition by single neurons in a sensory pathway devoted to social communication behavior. *Journal of Neuroscience*, 29, 9417–9428.
- Carnevale, F., de Lafuente, V., Romo, R., Barak, O., Parga, N. (2015). Dynamic control of response criterion in premotor cortex during perceptual detection under temporal uncertainty. *Neuron*, 86, 1067–1077.
- Carroll, S. (2010). From eternity to here: The quest for the ultimate theory of time. New York: Penguin. В русском переводе: Кэрролл Ш. Вечность. В поисках окончательной теории времени. – Питер, 2016.
- Chang, A. Y.-C., Tzeng, O. J. L., Hung, D. L., Wu, D. H. (2011). Big time is not always long: Numerical magnitude automatically affects time reproduction. *Psychological Science*, 22, 1567–1573.
- Chubykin, Alexander A., Roach, Emma B., Bear, Mark F., Shuler, Marshall G. H. (2013). A cholinergic mechanism for reward timing within primary visual cortex. *Neuron*, 77, 723–735.
- Cicchini, G. M., Arrighi, R., Cecchetti, L., Giusti, M., Burr, D. C. (2012). Optimal encoding of interval timing in expert percussionists. *Journal of Neuroscience*, 32, 1056–1060.
- Clark, A. (2013). Whatever next? Predictive brains, situated agents, and the future of cognitive science. *Behavioral and Brain Sciences*, 36, 181–204.
- Clayton, N. S., Dickinson, A. (1999). Scrub jays (*Aphelocoma coerulescens*) remember the relative time of caching as well as the location and content of their caches. *Journal of Comparative Psychology*, 113, 403–416.
- Clayton, N. S., Russell, J., Dickinson, A. (2009). Are animals stuck in time or are they chronesthetic creatures? *Topics in Cognitive Science*, 1, 59–71.
- Cohen, J., Hansel, C. E., Sylvester, J. D. (1953). A new phenomenon in time judgment. *Nature*, 172, 901.
- Colapinto, J. (2007). The interpreter. *The New Yorker*, April 16, 118–137.
- Collyer, C. E. (1976). The induced asynchrony effect: Its role in visual judgments of temporal order and its relation to other dynamic perceptual phenomena. *Perception & Psychophysics*, 19, 47–54.
- Colwell, C. S. (2011). Linking neural activity and molecular oscillations in the SCN. *Nature Reviews Neuroscience*, 12, 553–569.
- Corballis, M. C. (2011). The recursive mind: the origins of human language thought and civilization. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Cordes, S., Gallistel, C. R. (2008). Intact interval timing in circadian CLOCK mutants. *Brain Research*, 1227, 120–127.
- Coull, J. T., Cheng, R.-K., Meck, W. H. (2011). Neuroanatomical and neurochemical substrates of timing. *Neuropsychopharmacology*, 36, 3–25.
- Coull, J. T., Charras, P., Donadieu, M., Droit-Volet, S., Vidal, F. (2015). SMA selectively codes the active accumulation of temporal, not spatial, magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 2281–2298.
- Creelman, C. D. (1962). Human discrimination of auditory duration. *Journal of the Acoustical Society of America*, 34, 582–593.

- Critchfield, T. S., Kollins, S. H. (2001). Temporal discounting: basic research and the analysis of socially important behavior. *Journal of Applied Behavior Analysis*, 34, 101–122.
- Crowe, D. A., Averbeck, B. B., Chafee, M. V. (2010). Rapid sequences of population activity patterns dynamically encode task-critical spatial information in parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 30, 11640–11653.
- Crowe, D. A., Zarco, W., Bartolo, R., Merchant, H. (2014). Dynamic representation of the temporal and sequential structure of rhythmic movements in the primate medial premotor cortex. *Journal of Neuroscience*, 34, 11972–11983.
- Czeisler, C., Weitzman, E., Moore-Ede, M., Zimmerman, J., Knauer, R. (1980). Human sleep: its duration and organization depend on its circadian phase. *Science*, 210, 1264–1267.
- Davidson, A. J., Sellix, M. T., Daniel, J., Yamazaki, S., Menaker, M., Block, G. D. (2006). Chronic jet-lag increases mortality in aged mice. *Current Biology*, 16, R914–916.
- Davies, P. (1995). *About time: Einstein’s unfinished revolution*. New York: Simon & Schuster.
- Davies, P. (2012). That mysterious flow. *Scientific American*, 21, 8–13.
- Debanne, D., Gähwiler, B. H., Thompson, S. M. (1994). Asynchronous pre- and postsynaptic activity induces associative long-term depression in area CA1 of the rat hippocampus in vitro. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 91, 1148–1152.
- Dehaene, S. (2014). *Consciousness and the brain: Deciphering how the brain codes our thoughts*. New York: Viking. В русском переводе: Деан С. Сознание и мозг. Как мозг кодирует мысли. – Карьера Пресс, 2018.
- Dehaene, S., Changeux, J.-P. (2011). Experimental and theoretical approaches to conscious processing. *Neuron*, 70, 200–227.
- Dennett, D. C. (1991). *Consciousness explained*. New York: Little, Brown and Company.
- Dennett, D. C. (2003). *Freedom evolves*. New York: Penguin Books.
- DiCarlo, J. J., Cox, D. D. (2007). Untangling invariant object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 11, 333–341.
- Doupe, A. J., Kuhl, P. K. (1999). Birdsong and human speech: common themes and mechanisms. *Annual Review of Neuroscience*, 22, 567–631.
- Droit-Volet, S. (2003). Temporal experience and timing in children. In: *Functional and neural mechanisms of interval timing* (Meck, W.H., ed.), 183–288. Boca Raton: CRC Press.
- Dudai, Y., Carruthers, M. (2005). The Janus face of Mnemosyne. *Nature*, 434, 567.
- Duncan, D. E. (1999). *Calendar: humanity’s epic struggle to determine a true and accurate year*. New York: Avon Books.
- Eichenbaum, H. (2014). Time cells in the hippocampus: a new dimension for mapping memories. *National Review of Neuroscience*, 15, 732–744.
- Einstein, A. (1905). On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, 17, 891–921.
- Einstein, A., Infeld, L. (1938/1966). *The evolution of physics*. New York: Simon & Schuster. В русском переводе: Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. – Наука, 1954.
- Ellis, G. F. R. (2008). On the flow of time. FxQi Essay. http://fqx-iorg/data/essay-contest-files/Ellis_Fqxi_essay_contest__Epdf.
- Ellis, G. F. R. (2014). The evolving block universe and the meshing together of times. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1326, 26–41.
- Eriksson, P. S., Perfilieva, E., Bjork-Eriksson, T., Alborn, A. M., Nordborg, C., Peterson, D. A., Gage, F. H. (1998). Neurogenesis in the adult human hippocampus. *Nature Medicine*, 4, 1313–1317.
- Everett, D. (2008). *Don’t sleep, there are snakes*. New York: Pantheon. В русском переводе: Эверетт Д. Не спи – кругом змеи. – Языки славянских культур, 2016.

- Feldman, J. L., Del Negro, C. A. (2006). Looking for inspiration: new perspectives on respiratory rhythm. *National Review of Neuroscience*, 7, 232–241.
- Feldmeyer, D., Lubke, J., Silver, R. A., Sakmann, B. (2002). Synaptic connections between layer 4 spiny neurone-layer 2/3 pyramidal cell pairs in juvenile rat barrel cortex: physiology and anatomy of interlaminar signalling within a cortical column. *Journal of Physiology*, 538, 803–822.
- Földiák, P. (1991). Learning invariance from transformation sequences. *Neural Computation*, 3, 194–200.
- Fortune, E. S., Rose, G. J. (2001). Short-term synaptic plasticity as a temporal filter. *Trends in Neurosciences*, 24, 381–385.
- Foster, K. R., Kokko, H. (2009). The evolution of superstitious and superstition-like behaviour. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 276, 31–37.
- Foster, R. G., Wulff, K. (2005). The rhythm of rest and excess. *National Review of Neuroscience*, 6, 407–414.
- Foster, R. G., Roenneberg, T. (2008). Human responses to the geophysical daily, annual and lunar cycles. *Current Biology*, 18, R784– R794.
- Fox, D. (2011). The limits of intelligence. *Scientific American*, July, 36–43.
- Fraisse, P. (1963). *The psychology of time*. New York: Harper & Row.
- Fraps, T. (2014). Time and magic-manipulating subjective temporality. In: *Subjective time: the philosophy, psychology, and neuroscience of temporality* (Arstila, V., Lloyd, D., eds.), 263–285. Cambridge, MA: MIT Press.
- Frederick, S., Loewenstein, G., O'Donoghue, T. (2002). Time discounting and time preference: a critical review. *Journal of Economic Literature*, 45, 351–401.
- Fried, I., Mukamel, R., Kreiman G. (2011). Internally generated preactivation of single neurons in human medial frontal cortex predicts volition. *Neuron*, 69, 548–562.
- Fujisaki, W., Shimojo, S., Kashino, M., Nishida S. (2004). Recalibration of audiovisual simultaneity. *Nature Neuroscience*, 7, 773–778.
- Fuster, J. M., Bressler, S. L. (2014). Past makes future: Role of pFC in prediction. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27, 639–654.
- Galison, P. (2003). *Einstein's clocks and Poincaré's maps: Empires of time*. New York: W. W. Norton.
- Garcia, K. S., Mauk, M. D. (1998). Pharmacological analysis of cerebellar contributions to the timing and expression of conditioned eyelid responses. *Neuropharmacology*, 37, 471–480.
- Gazzaniga, M. S. (2011). Neuroscience in the courtroom. *Scientific American*, April, 54–59.
- Gazzaniga, M. S., Steven, M. S. (2005). Neuroscience and the law. *Scientific American Mind*, 16, 42–49.
- Geldard, F. A., Sherrick, C. E. (1972). The cutaneous “rabbit”: A perceptual illusion. *Science*, 178, 178–179.
- Genovesio, A., Tsujimoto, S. (2014). From duration and distance comparisons to goal encoding in prefrontal cortex. In: *Neurobiology of Interval Timing* (Merchant, H., de Lafuente, V., eds.), 167–186. New York: Springer.
- Gibbon, J. (1977). Scalar expectancy theory and Weber's law in animal timing. *Psychological Review*, 84, 279–325.
- Gibbon, J., Church, R. M., Meck, W. H. (1984). Scalar timing in memory. *Annals of the New York Academy of Science*, 423, 52–77.
- Gilbert, D. (2007). *Stumbling on happiness*. New York: Vintage Books. В русском переводе: Гилберт Д. Спотыкаясь о счастье. – Альпина Паблишер, 2015.
- Goel, A., Buonomano, D. V. (2014). Timing as an intrinsic property of neural networks: evidence from in vivo and in vitro experiments. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Science*, 369, 20120460.

- Goel, A., Buonomano, D. V. (2016). Temporal interval learning in cortical cultures is encoded in intrinsic network dynamics. *Neuron*, 91, 320–327.
- Goldreich, D. (2007). A Bayesian perceptual model replicates the cutaneous rabbit and other tactile spatiotemporal illusions. *PLoS ONE*, 2, e333.
- Goldreich, D., Tong, J. (2013). Prediction, postdiction, and perceptual length contraction: a Bayesian low-speed prior captures the cutaneous rabbit and related illusions. *Frontiers in Psychology*, 4, 579.
- Golombek, D. A., Bussi, I. L., Agostino, P. V. (2014). Minutes, days and years: molecular interactions among different scales of biological timing. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369, 20120465.
- Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: evidence from Amazonia. *Science*, 306, 496–499.
- Greene, B. (2004). *The fabric of the cosmos: Space, time, and the texture of reality*. New York: Vintage Books. В русском переводе: Грин Б. Ткань космоса: пространство, время и текстура реальности. – Либроком, 2009.
- Grondin, S., Kuroda, T., Mitsudo, T. (2011). Spatial effects on tactile duration categorization. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 65, 163–167.
- Gutierrez, E. (2013). A rat in the labyrinth of anorexia nervosa: Contributions of the activity-based anorexia rodent model to the understanding of anorexia nervosa. *International Journal of Eating Disorders*, 46, 289–301.
- Haeusler, S., Maass, W. (2007). A statistical analysis of information-processing properties of lamina-specific cortical microcircuit models. *Cerebral Cortex*, 17, 149–162.
- Hafele, J. C., Keating, R. E. (1972a). Around-the-world atomic clocks: Observed relativistic time gains. *Science*, 177, 168–170.
- Hafele, J. C., Keating, R. E. (1972b). Around-the-world atomic clocks: Predicted relativistic time gains. *Science*, 177, 166–168.
- Haggard, P. (2008). Human volition: towards a neuroscience of will. *National Review of Neuroscience*, 9, 934–946.
- Haggard, P. (2011). Decision time for free will. *Neuron*, 69, 404–406.
- Hahnloser, R. H. R., Kozhevnikov, A. A., Fee M. S. (2002). An ultrasparse code underlies the generation of neural sequence in a songbird. *Nature*, 419, 65–70.
- Hakimi, S., Hare, T. A. (2015). Enhanced neural responses to imagined primary rewards predict reduced monetary temporal discounting. *Journal of Neuroscience*, 35, 13103–13109.
- Hammond, C. (2012). *Time warped: Unlocking the mysteries of time perception*. New York: Harper-Perennial.
- Han, C. J., Robinson, J. K. (2001). Cannabinoid modulation of time estimation in the rat. *Behavioral Neuroscience* 115, 243–246.
- Harrington, D. L., Castillo, G. N., Reed J. D., Song, D. D., Lit-van I., Lee, R. R. (2014). Dissociation of neural mechanisms for intersensory timing deficits in Parkinson's disease. *Timing & Time Perception*, 2, 145–168.
- Harris, S. (2012). *Free will*. New York: Free Press. В русском переводе: Харрис С. Свобода воли, которой не существует. – Альпина Паблишер, 2015.
- Hassabis, D., Kumaran, D., Vann, S. D., Maguire, E. A. (2007). Patients with hippocampal amnesia cannot imagine new experiences. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 104, 1726–1731.
- Hawking, S. (1996). *A brief history of time*. New York: Bantam Books. В русском переводе: Хокинг С. Краткая история времени. – АСТ, 2017.

- Hayashi, M. J., Kanai, R., Tanabe, H. C., Yoshida, Y., Carlson, S., Walsh, V., Sadato, N. (2013). Interaction of numerosity and time in prefrontal and parietal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33, 883–893.
- Helson, H., King, S. M. (1931). The tau effect: an example of psychological relativity. *Journal of Experimental Psychology*, 14, 202–217.
- Henderson, J., Hurly, T. A., Bateson, M., Healy, S. D. (2006). Timing in free-living rufous hummingbirds, *Selasphorus rufus*. *Current Biology*, 16, 512–515.
- Herculano-Houzel, S. (2009). The human brain in numbers: a linearly scaled-up primate brain. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3.
- Herzog, E. D., Aton, S.J., Numano, R., Sakaki, Y., Tei H. (2004). Temporal precision in the mammalian circadian system: A reliable clock from less reliable neurons. *Journal of Biological Rhythms*, 19, 35–46.
- Herzog M. H., Kammer T., Scharnowski F. (2016). Time slices: What is the duration of a percept? *PLoS Biol*, 14, e1002433.
- Hicks, R. E., Miller, G. W., Kinsbourne, M. (1976). Prospective and retrospective judgments of time as a function of amount of information processed. *American Journal of Psychology*, 89, 719–730.
- Hinkley, N., Sherman, J. A., Phillips, N. B., Schioppo, M., Lemke, N. D., Beloy, K., Pizzocaro, M., Oates, C. W., Ludlow, A. D. (2013). An atomic clock with 10–18 instability. *Science*, 341, 1215–1218.
- Honing, H., Merchant, H., Háden, G. P., Prado, L., Bartolo, R. (2012). Rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) detect rhythmic groups in music, but not the beat. *PLoS ONE*, 7, e51369.
- Hoskins, J. (1993). *The play of time: Kodi perspectives on calendars, history, and exchange*. Berkeley: University of California Press.
- Huang, Y., Jones, B. (1982). On the interdependence of temporal and spatial judgments. *Perception & Psychophysics*, 32, 7–14.
- Hume, D. (1739/2000). *A treatise on human nature*. Oxford: Oxford University Press. В русском переводе: Юм Д. Трактат о человеческой природе. – Азбука, 2001.
- Hussain, F., Gupta, C., Hirning, A. J., Ott, W., Matthews, K. S., Josić K., Bennett, M. R. (2014). Engineered temperature compensation in a synthetic genetic clock. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111, 972–977. – Huxley, T. H. (1894/1911). *Collected essays: Method and results*. New York: D. Appleton.
- Ikeda, H., Kubo, T., Kuriyama, K., Takahashi, M. (2014). Self-awakening improves alertness in the morning and during the day after partial sleep deprivation. *Journal of Sleep Research*, 23, 673–680.
- Ishihara, M., Keller, P. E., Rossetti, Y., Prinz, W. (2008). Horizontal spatial representations of time: Evidence for the STEARC effect. *Cortex*, 44, 454–461.
- Ishizawa, Y., Ahmed, O. J., Patel, S. R., Gale, J. T., Sierra-Mercado, D., Brown, E. N., Eskandar, E. N. (2016). Dynamics of propofol-induced loss of consciousness across primate neocortex. *Journal of Neuroscience*, 36, 7718–7726.
- Ivry, R. B., Schlerf, J. E. (2008). Dedicated and intrinsic models of time perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 12, 273–280.
- Jacobs, B., Schall, M., Prather, M., Kapler, E., Driscoll, L., Baca, S., Jacobs, J., Ford, K., Wainwright, M., Trembl, M. (2001). Regional dendritic and spine variation in human cerebral cortex: A quantitative golgi study. *Cerebral Cortex*, 11, 558–571. – James, W. (1890). *The principles of psychology*. New York: Dover Publications. В русском переводе: Джеймс У. Психология. – Педагогика, 1991.
- Janssen, P., Shadlen, M. N. (2005). A representation of the hazard rate of elapsed time in the macaque area LIP. *Nature Neuroscience*, 8, 234–241.

- Jazayeri, M., Shadlen, M. N. (2010). Temporal context calibrates interval timing. *Nature Neuroscience*, 13, 1020–1026.
- Jazayeri, M., Shadlen, M. N. (2015). A neural mechanism for sensing and reproducing a time interval. *Current Biology*, 25, 2599–2609.
- Jin, D. Z., Fujii, N., Graybiel, A. M. (2009). Neural representation of time in cortico-basal ganglia circuits. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 106, 19156–19161.
- Johnson, C. H., Golden, S. S., Kondo, T. (1998). Adaptive significance of circadian programs in cyanobacteria. *Trends in Microbiology*, 6, 407–410.
- Johnson, H. A., Goel, A., Buonomano, D. V. (2010). Neural dynamics of in vitro cortical networks reflects experienced temporal patterns. *Nature Neuroscience*, 13, 917–919.
- Jones, C. R., Campbell, S. S., Zone, S. E., Cooper, F., DeSano, A., Murphy, P. J., Jones, B., Czajkowski, L., Ptáček, L., J. (1999). Familial advanced sleep-phase syndrome: A short-period circadian rhythm variant in humans. *Nature Medicine*, 5, 1062–1065.
- Jones, C. R., Huang, A. L., Ptáček, L. J., Fu, Y.-H. (2013). Genetic basis of human circadian rhythm disorders. *Experimental Neurology*, 243, 28–33.
- Kable, J. W., Glimcher, P. W. (2007). The neural correlates of subjective value during intertemporal choice. *Nature Neuroscience*, 10, 1625–1633.
- Kanabus, M., Szelag, E., Rojek, E., Poppel, E. (2002). Temporal order judgment for auditory and visual stimuli. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 62, 263–270.
- Kandel, E. (2013). The new science of mind and the future of knowledge. *Neuron*, 80, 546–560.
- Kandel, E. R., Schartz, J., Jessel, T., Siegelbaum, S. A., Hudspeth, A. J. (2013). Principles of neural science, 5th ed. New York: McGraw-Hill Medical.
- Karlsson, M. P., Frank, L. M. (2009). Awake replay of remote experiences in the hippocampus. *Nature Neuroscience*, 12, 913–918.
- Karmarkar, U. R., Najarian, M. T., Buonomano, D. V. (2002). Mechanisms and significance of spike-timing dependent plasticity. *Biological Cybernetics*, 87, 373–382.
- Keele, S. W., Pokorny, R. A., Corcos, D. M., Ivry, R. (1985). Do perception and motor production share common timing mechanisms: a correctional analysis. *Acta Psychologica (Amst.)*, 60, 173–191.
- Kiesel, A., Vierck, E. (2009). SNARC-like congruency based on number magnitude and response duration. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 35, 275–279.
- Kilgard, M. P., Merzenich, M. M. (1995). Anticipated stimuli across skin. *Nature*, 373, 663.
- Kilgard, M. P., Merzenich, M. M. (2002). Order-sensitive plasticity in adult primary auditory cortex. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 99, 3205–3209.
- Killingsworth, M. A., Gilbert, D. T. (2010). A wandering mind is an unhappy mind. *Science*, 330, 932.
- Kim, J., Ghim, J.-W., Lee, J. H., Jung, M. W. (2013). Neural correlates of interval timing in rodent prefrontal cortex. *Journal of Neuroscience*, 33, 13834–13847.
- Kivimäki, M., Batty, G. D., Hublin, C. (2011). Shift work as a risk factor for future type 2 diabetes: evidence, mechanisms, implications, and future research directions. *PLoS Med*, 8, e1001138.
- Klampf I, S., David, S. V., Yin, P., Shamma, S. A., Maass, W. (2012). A quantitative analysis of information about past and present stimuli encoded by spikes of A1 neurons. *Journal of Neurophysiology*, 108, 1366–1380.
- Knutsson, A. (2003). Health disorders of shift workers. *Occupational Medicine*, 53, 103–108.
- Koch, C. (2004). The quest for consciousness: A neurobiological approach. Englewood, CO: Robers & Company.

- Konopka, R. J., Benzer, S. (1971). Clock mutants of *Drosophila melanogaster*. *Proceedings of the National Academy of Science USA*, 68, 2112–2116.
- Kording, K. (2007). Decision theory: What “should” the nervous system do? *Science*, 318, 606–610.
- Kostarakos, K., Hedwig, B. (2012). Calling song recognition in female crickets: Temporal tuning of identified brain neurons matches behavior. *Journal of Neuroscience*, 32, 9601–9612.
- Kraus, B. J., Robinson, R. J., White, J. A., Eichenbaum, H., Hasselmo, M. E. (2013). Hippocampal “time cells”: Time versus path integration. *Neuron*, 78, 1090–1101.
- Kwan, D., Craver, C. F., Green, L., Myerson, J., Boyer P., Rosenbaum, R. S. (2012). Future decision-making without episodic mental time travel. *Hippocampus*, 22, 1215–1219.
- Kyriacou, C. P., Hall, J. C. (1980). Circadian rhythm mutations in *Drosophila melanogaster* affect short-term fluctuations in the male’s courtship song. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 77, 6729–6733.
- Laje, R., Buonomano, D. V. (2013). Robust timing and motor patterns by taming chaos in recurrent neural networks. *Nature Neuroscience* 16, 925–933.
- Lakoff, G., Johnson, M. (1980/2003). *Metaphors we live by*. Chicago: University of Chicago Press. В русском переводе: Лакофф Дж., Джонсон М. Метафоры, которыми мы живем. – УРСС, 2004.
- Lamy, D., Salti, M., Bar-Haim, Y. (2009). Neural correlates of subjective awareness and unconscious processing: an ERP study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 21, 1435–1446.
- Landes, D. S. (1983). *Revolution in time: Clocks and the making of the modern world*. New York: Barnes & Noble.
- Lashley, K. S., ed. (1951). *The problem of serial order in behavior*. New York: Wiley.
- Lasky, R. (2012). Time and the twin paradox. *Scientific American*, 21, 30–33.
- Lau, H. C., Rogers, R. D., Passingham R. E. (2007). Manipulating the experienced onset of intention after action execution. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19, 81–90.
- Lavie, P. (2001). Sleep-wake as a biological rhythm. *Annual Review of Psychology*, 52, 277–303.
- Lebedev, M. A., O’Doherty, J. E., Nicolelis, M. A. L. (2008). Decoding of temporal intervals from cortical ensemble activity. *Journal of Neurophysiology*, 99, 166–186.
- Lee, T. P., Buonomano, D. V. (2012). Unsupervised formation of vocalization-sensitive neurons: a cortical model based on short-term and homeostatic plasticity. *Neural Computation*, 24, 2579–2603.
- Lehiste, I. (1960). An acoustic–phonetic study of internal open juncture. *Phonetica*, 5 (suppl. 1), 5–54.
- Lehiste, I., Olive, J. P., Streeter, L. A. (1976). Role of duration in disambiguating syntactically ambiguous sentences. *Journal of the Acoustical Society of America*, 60, 1199–1202.
- Leon, M. I., Shadlen, M. N. (2003). Representation of time by neurons in the posterior parietal cortex of the macaque. *Neuron*, 38, 317–327.
- Levine, R. (1996). *The geography of time*. New York: Basic Books.
- Levy, W. B., Steward, O. (1983). Temporal contiguity requirements for long-term associative potentiation/depression in the hippocampus. *Neuroscience*, 8, 791–797.
- Lewis, P. A., Miall, R. C., Daan, S., Kacelnik, A. (2003). Interval timing in mice does not rely upon the circadian pacemaker. *Neuroscience Letters*, 348, 131–134.
- Libet, B., Gleason, C. A., Wright, E. W., Pearl, D. K. (1983). Time of conscious intention to act in relation to onset of cerebral activity (readiness-potential). The unconscious initiation of a freely voluntary act. *Brain*, 106 (Pt. 3), 623–642.
- Lieving, L. M., Lane, S. D., Cherek, D. R., Tcheremissine, O. V. (2006). Effects of marijuana on temporal discriminations in humans. *Behavioral Pharmacology*, 17, 173–183.

- Livesey, A. C., Wall, M. B., Smith, A. T. (2007). Time perception: Manipulation of task difficulty dissociates clock functions from other cognitive demands. *Neuropsychologia*, 45, 321–331.
- Lockwood, M. (2005). *The labyrinth of time: Introducing the universe*. Oxford: Oxford University Press.
- Loftus, E. F. (1996). *Eyewitness testimony*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Loftus, E. F., Schooler, J. W., Boone, S. M., Kline, D. (1987). Time went by so slowly: overestimation of event duration by males and females. *Applied Cognitive Psychology*, 1, 3–13.
- Loh, D. H., Navarro, J., Hagopian, A., Wang, L. M., Deboer, T., Colwell, C. S. (2010). Rapid changes in the light/dark cycle disrupt memory of conditioned fear in mice. *PLoS ONE*, 5, e12546.
- Lombardi, M. A. (2002). Fundamentals of time and frequency. In: *Mechanotronics handbook* (Bishop, RH, ed.). New York: CRC Press.
- Long, M. A., Fee, M. S. (2008). Using temperature to analyse temporal dynamics in the songbird motor pathway. *Nature*, 456, 189–194.
- Long, M. A., Jin, D. Z., Fee, M. S. (2010). Support for a synaptic chain model of neuronal sequence generation. *Nature*, 468, 394–399.
- Maass, W., Natschläger, T., Markram, H. (2002). Real-time computing without stable states: A new framework for neural computation based on perturbations. *Neural Computation*, 14, 2531–2560.
- MacDonald, C. J., Lepage, K. Q., Eden, U. T., Eichenbaum, H. (2011). Hippocampal “time cells” bridge the gap in memory for discontinuous events. *Neuron*, 71, 737–749.
- MacDonald, C. J., Carrow, S., Place, R., Eichenbaum, H. (2013). Distinct hippocampal time cell sequences represent odor memories in immobilized rats. *Journal of Neuroscience*, 33, 14607–14616.
- MacKillop, J., Amlung, M. T., Few, L. R., Ray, L. A., Sweet, L. H., Munafò, M. R. (2011). Delayed reward discounting and addictive behavior: a meta-analysis. *Psychopharmacology* (Berl.), 216, 305–321.
- Mante, V., Sussillo, D., Shenoy, K. V., Newsome, W. T. (2013). Context-dependent computation by recurrent dynamics in prefrontal cortex. *Nature*, 503, 78–84.
- Markram, H., Lubke, J., Frotscher, M., Sakmann, B. (1997). Regulation of synaptic efficacy by coincidence of postsynaptic APs and EPSPs. *Science*, 275, 213–215.
- Martin, F. H., Garfield, J. (2006). Combined effects of alcohol and caffeine on the late components of the event-related potential and on reaction time. *Biological Psychology*, 71, 63–73.
- Matell, M. S., Meck, W. H. (2004). Cortico-striatal circuits and interval timing: coincidence detection of oscillatory processes. *Cognitive Brain Research* 21, 139–170.
- Matsuda, F. (1996). Duration, distance, and speed judgments of two moving objects by 4- to 11-year olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 63, 286–311.
- Matthews, M. R. (2000). *Time for science education: how teaching the history and philosophy of pendulum motion can contribute to science literacy*. New York: Kluwer Academic.
- Matthews, W. J. (2015). Time perception: The surprising effects of surprising stimuli. *Journal of Experimental Psychology: General*, 144, 172–197.
- Matthews, W. J., Meck, W. H. (2016). Temporal cognition: Connecting subjective time to perception, attention, and memory. *Psychological Bulletin*, 142, 865–890.
- Mauk, M. D., Donegan, N. H. (1997). A model of Pavlovian eyelid conditioning based on the synaptic organization of the cerebellum. *Learning & Memory*, 3, 130–158.
- Mauk, M. D., Buonomano, D. V. (2004). The neural basis of temporal processing. *Annual Review of Neuroscience*, 27, 307–340.
- McClure, G. Y., McMillan, D. E. (1997). Effects of drugs on response duration differentiation. VI: differential effects under differential reinforcement of low rates of responding schedules. *Journal of Pharmacology and Experimental Therapeutics*, 281, 1368–1380.

- McClure, S. M., Laibson, D. I., Loewenstein, G., Cohen, J. D. (2004). Separate neural systems value immediate and delayed monetary rewards. *Science*, 306, 503–507.
- McGlone, M. S., Harding, J. L. (1998). Back (or forward?) to the future: The role of perspective in temporal language comprehension. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, 1211–1223.
- Meck, W. H. (1996). Neuropharmacology of timing and time perception. *Cognitive Brain Research*, 3, 227–242.
- Medina, J. F., Garcia, K. S., Noes, W. L., Taylor, N. M., Mauk, M. D. (2000). Timing mechanisms in the cerebellum: testing predictions of a large-scale computer simulation. *Journal of Neuroscience*, 20, 5516–5525.
- Mégevand, P., Molholm, S., Nayak, A., Foxe, J. J. (2013). Recalibration of the multisensory temporal window of integration results from changing task demands. *PLoS ONE*, 8, e71608.
- Meijer, J. H., Robbers, Y. (2014). Wheel running in the wild. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, 281, 20140210.
- Mello, G. B. M., Soares, S., Paton, J. J. (2015). A scalable population code for time in the striatum. *Current Biology*, 9, 1113–1122.
- Merchant, H., Harrington, D. L., Meck, W. H. (2013). Neural basis of the perception and estimation of time. *Annual Review of Neuroscience*, 36, 313–336.
- Meyer, L. (1961). *Emotion and meaning in music*. Chicago: University of Chicago Press.
- Miall, C. (1989). The storage of time intervals using oscillating neurons. *Neural Computation*, 1, 359–371.
- Milham, W. I. (1941) *Time & timekeepers: Including the history, construction, care, and accuracy of clocks and watches*. London: Macmillan, 37.
- Mita, A., Mushiake, H., Shima, K., Matsuzaka, Y., Tanji, J. (2009). Interval time coding by neurons in the presupplementary and supplementary motor areas. *Nature Neuroscience*, 12, 502–507.
- Modi, M. N., Dhawale, A. K., Bhalla, U. S. (2014). CA1 cell activity sequences emerge after reorganization of network correlation structure during associative learning. *Elife*, 3, e01982.
- Montague, P. R. (2008). Free will. *Current Biology*, 18, R584–R585.
- Moorcroft, W. H., Kayser, K. H., Griggs, A. J. (1997). Subjective and objective confirmation of the ability to self-awaken at a self-predetermined time without using external means. *Sleep*, 20, 40–45.
- Morrone, M. C., Ross, J., Burr, D. (2005). Saccadic eye movements cause compression of time as well as space. *Nature Neuroscience*, 8, 950–954.
- Morrow, N. S., Schall, M., Grijalva, C. V., Geiselman, P. J., Garrick, T., Nuccion, S., Novin, D. (1997). Body temperature and wheel running predict survival times in rats exposed to activity-stress. *Physiology & Behavior*, 62, 815–825.
- Muller, T., Nobre, A. C. (2014). Perceiving the passage of time: neural possibilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1326, 60–71.
- Mumford, L. (2010/1934). *Technics & civilization*. Chicago: University of Chicago Press.
- Murakami, M., Vicente, M. I., Costa, G. M., Mainen, Z. F. (2014). Neural antecedents of self-initiated actions in secondary motor cortex. *Nature Neuroscience*, 17, 1574–1582.
- Nagarajan, S. S., Blake, D. T., Wright, B. A., Byl, N., Merzenich, M. M. (1998). Practice-related improvements in somatosensory interval discrimination are temporally specific but generalize across skin location, hemisphere, and modality. *Journal of Neuroscience*, 18, 1559–1570.
- Nichols, S. (2011). Experimental philosophy and the problem of free will. *Science*, 331, 1401–1403.
- Nikolić, D., Häusler, S., Singer, W., Maass, W. (2009). Distributed fading memory for stimulus properties in the primary visual cortex. *PLoS Biol*, 7, e1000260.
- Noyes, R., Kletti, R. (1972). The experience of dying from falls. *Omega*, 3, 45–52.

- Noyes, R., Kletti, R. (1976). Depersonalization in face of life-threatening danger. *Psychiatry-Interpersonal and Biological Processes*, 39, 19–27.
- Núñez, R., Cooperrider, K. (2013). The tangle of space and time in human cognition. *Trends in Cognitive Science*, 17, 220–229.
- Núñez, R. E., Sweetser, E. (2006). With the future behind them: convergent evidence from Aymara language and gesture in the crosslinguistic comparison of spatial construals of time. *Cognitive Science*, 30, 401–450.
- Ohyama, T., Noes, W. L., Murphy, M., Mauk, M. D. (2003). What the cerebellum computes. *Trends in Neurosciences*, 26, 222–227.
- Oliveri, M., Vicario, C. M., Salerno, S., Koch, G., Turriziani, P., Mangano, R., Chillemi, G., Caltagirone, C. (2008). Perceiving numbers alters time perception. *Neuroscience Letters*, 438, 308–311.
- Ornstein, R. E. (1969). *On the experience of time*. Harmondsworth: Penguin.
- Osvath, M., Persson, T. (2013). Great apes can defer exchange: a replication with different results suggesting future oriented behavior. *Frontiers in Psychology*, 4, 698.
- Ouyang, Y., Andersson, C. R., Kondo, T., Golden, S. S., Johnson, C. H. (1998). Resonating circadian clocks enhance fitness in cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95, 8660–8664.
- Panagiotaropoulos, T. I., Deco, G., Kapoor, V., Logothetis, N. K. (2012). Neuronal discharges and gamma oscillations explicitly reflect visual consciousness in the lateral prefrontal cortex. *Neuron*, 74, 924–935.
- Papachristos, E. B., Jacobs, E. H., Elgersma, Y. (2011). Interval timing is intact in arrhythmic *Cry1/Cry2*-deficient mice. *Journal of Biological Rhythms*, 26, 305–313.
- Papert, S. (1999). Child psychologist Jean Piaget. *Time*, March 29.
- Pariyadath, V., Eagleman, D. M. (2007). The effect of predictability on subjective duration. *PLoS ONE*, 2, e1264.
- Park, J., Schlag-Rey, M., Schlag, J. (2003). Voluntary action expands perceived duration of its sensory consequence. *Experimental Brain Research*, 149, 527–529.
- Pastalkova, E., Itskov, V., Amarasingham, A., Buzsaki, G. (2008). Internally generated cell assembly sequences in the rat hippocampus. *Science*, 321, 1322–1327.
- Patel, A. B., Loerwald, K. W., Huber, K. M., Gibson, J. R. (2014). Postsynaptic FMRP promotes the pruning of cell-to-cell connections among pyramidal neurons in the L5A neocortical network. *Journal of Neuroscience*, 34, 3413–3418.
- Patel, A. D. (2006). Musical rhythm, linguistic rhythm, and human evolution. *Music Perception*, 24, 99–104.
- Patel, A. D., Iversen, J. R., Bregman, M. R., Schulz, I. (2009). Studying synchronization to a musical beat in nonhuman animals. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1169, 459–469.
- Penrose, R. (1989/1999). *The emperor's new mind*. Oxford: Oxford University Press. В русском переводе: Пенроуз Р. Новый ум короля. – УРСС, 2008.
- Perrett, S. P., Ruiz, B. P., Mauk, M. D. (1993). Cerebellar cortex lesions disrupt learning-dependent timing of conditioned eyelid responses. *Journal of Neuroscience*, 13, 1708–1718.
- Peters, J. (2011). The role of the medial orbitofrontal cortex in intertemporal choice: Prospection or valuation? *Journal of Neuroscience*, 31, 5889–5890.
- Peters, J., Büchel, C. (2010). Episodic future thinking reduces reward delay discounting through an enhancement of prefrontal-mediotemporal interactions. *Neuron*, 66, 138–148.
- Piaget, J. (1946/1969). *The child's conception of time*. New York: Basic Books.
- Piaget, J. (1972). *Psychology and epistemology: towards a theory of knowledge*. London: Penguin Press.

- Pierce, W. D., Epling, W. F., Boer, D. P. (1986). Deprivation and satiation: The interrelations between food and wheel running. *Journal of the Experimental Analysis of Behavior*, 46, 199–210.
- Pinker, S. (2007). The stuff of thought: Language as a window into human nature. New York: Penguin Books. В русском переводе: Пинкер С. Субстанция мышления. Язык как окно в человеческую природу. – Либроком, 2013.
- Pinker, S. (2014). The sense of style: The thinking person's guide to writing in the 21st century. New York: Penguin. В русском переводе: Пинкер С. Чувство стиля. Современное руководство по созданию выдающихся текстов. – Манн, Иванов и Фербер, 2019.
- Popper, K. (1992). Unended quest: An intellectual autobiography. London: Routledge. В русском переводе: Поппер К. Неоконченный поиск. Интеллектуальная автобиография. – Практик-сис, 2014.
- Prelec, D., Simester, D. (2001). Always leave home without it: A further investigation of the credit-card effect on willingness to pay. *Marketing Letters*, 12, 5–12.
- Price-Williams, D. R. (1954). The kappa effect. *Nature*, 173, 363–364.
- Prigogine, I., Stengers, I. (1984). Order out of chaos: man's new dialogue with nature. Toronto: Bantam. В русском переводе: Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. – Прогресс, 1986.
- Purdon, P. L., Pierce, E. T., Mukamel, E. A., Prerau, M.J., Walsh, J. L., Wong, K. F. K., Salazar-Gomez, A. F., Harrell, P. G., Sampson A. L., Cimenser, A., Ching, S., Kopell, N. J., Tavares-Stoeckel, C., Habeeb, K., Merhar, R., Brown, E. N. (2013). Electroencephalogram signatures of loss and recovery of consciousness from propofol. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110, E1142–E1151.
- Purves, D., Brannon, E. M., Cabeza, R., Huettel, S. A., LaBar, K. S., Platt, M. L., Woldorff, M. G. (2008). Principles of Cognitive Neuroscience. Sunderland, MA: Sinauer.
- Putnam, H. (1967). Time and physical geometry. *Journal of Philosophy*, 64, 240–247.
- Quintana, J., Fuster, J. M. (1992). Mnemonic and predictive functions of cortical neurons in a memory task. *Neuroreport*, 3, 721–724.
- Raby, C. R., Alexis, D. M., Dickinson, A., Clayton, N. S. (2007). Planning for the future by western scrub-jays. *Nature*, 445, 919–921.
- Race, E., Keane, M. M., Verfaellie, M. (2011). Medial temporal lobe damage causes deficits in episodic memory and episodic future thinking not attributable to deficits in narrative construction. *Journal of Neuroscience*, 31, 10262–10269.
- Rae, A. (1986). Quantum physics: illusion or reality? Cambridge: Cambridge University Press.
- Raghbir, P., Srivastava, J. (2008). Monopoly money: the effect of payment coupling and form on spending behavior. *Journal of Experimental Psychology Applied*, 14, 213–225.
- Ralph, M. R., Foster, R. G., Davis, F. C., Menaker, M. (1990). Transplanted suprachiasmatic nucleus determines circadian period. *Science*, 247, 975–978.
- Rammsayer, T. (1992). Effects of benzodiazepine-induced sedation on temporal processing. *Human Psychopharmacology*, 7, 311–318.
- Rammsayer, T. H. (1999). Neuropharmacological evidence for different timing mechanisms in humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology B*, 52, 273–286.
- Rammsayer, T. H., Vogel, W. H. (1992). Pharmacological properties of the internal clock underlying time perception in humans. *Neuropsychobiology*, 26, 71–80.
- Rammsayer, T. H., Buttkus, F., Altenmuller, E. (2012). Musicians do better than nonmusicians in both auditory and visual timing tasks. *Music Perception*, 30, 85–96.
- Raymond, J., Lisberger, S. G., Mauk, M. D. (1996). The cerebellum: a neuronal learning machine? *Science*, 272, 1126–1132.

- Reddy, P., Zehring, W. A., Wheeler, D. A., Pirrotta, V., Hadfield, C., Hall, J. C., Rosbash, M. (1984). Molecular analysis of the period locus in *Drosophila melanogaster* and identification of a transcript involved in biological rhythms. *Cell*, 38, 701–710.
- Rennaker, R. L., Carey, H. L., Anderson, S. E., Sloan, A. M., Kilgard, M. P. (2007). Anesthesia suppresses nonsynchronous responses to repetitive broadband stimuli. *Neuroscience*, 145, 357–369.
- Reyes, A., Sakmann, B. (1999). Developmental switch in the short-term modification of unitary EPSPs evoked in layer 2/3/ and layer 5 pyramidal neurons of rat neocortex. *Journal of Neuroscience* 19, 3827–3835.
- Richards, W. (1973). Time reproductions by H.M. *Acta Psychologica*, 37, 279–282.
- Rietdijk, C. W. (1966). A rigorous proof of determinism derived from the special theory of relativity. *Philosophy of Science*, 33, 341–344.
- Rigotti, M., Barak, O., Warden, M. R., Wang, X.-J., Daw, N. D., Miller, E. K., Fusi, S. (2013). The importance of mixed selectivity in complex cognitive tasks. *Nature*, 497, 585–590.
- Rose, G., Leary, C., Edwards, C. (2011). Interval-counting neurons in the anuran auditory midbrain: factors underlying diversity of interval tuning. *Journal of Comparative Physiology A: Neuroethology, Sensory, Neural, and Behavioral Physiology*, 197, 97–108.
- Routtenberg, A., Kuznesof, A. W. (1967). Self-starvation of rats living in activity wheels on a restricted feeding schedule. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 64, 414–421.
- Rovelli, C. (2004). Quantum gravity. Cambridge: Cambridge University Press.
- Sacks, O. (2004). Speed. *The New Yorker*, Aug. 23, 60–69.
- Sadagopan, S., Wang, X. (2009). Nonlinear spectrotemporal interactions underlying selectivity for complex sounds in auditory cortex. *Journal of Neuroscience*, 29, 11192–11202.
- Saj, A., Fuhrman, O., Vuilleumier, P., Boroditsky, L. (2014). Patients with left spatial neglect also neglect the “left side” of time. *Psychological Science*, 25, 207–214.
- Salti, M., Monto, S., Charles, L., King, J.-R., Parkkonen, L., Dehaene, S. (2015). Distinct cortical codes and temporal dynamics for conscious and unconscious percepts. *eLife*, 4, e05652.
- Sarrazin, J. C., Giraudo, M. D., Pailhous, J., Bootsma, R. J. (2004). Dynamics of balancing space and time in memory: tau and kappa effects revisited. *Journal of Experimental Psychology Human Perception and Performance*, 30, 411–430.
- Sauer, T., ed. (2014). Piaget, Einstein, and the concept of time. Berlin: Edition Open Access.
- Scarf, D., Smith, C., Stuart, M. (2014). A spoon full of studies helps the comparison go down: a comparative analysis of Tulving’s spoon test. *Frontiers in Psychology*, 5, 893.
- Schacter, D. L. (1996). Searching for memory. New York: Basic Books.
- Schacter, D. L., Addis, D. R. (2007). Constructive memory: The ghosts of past and future. *Nature*, 445, 27.
- Schacter, D. L., Addis D. R., Buckner R. L. (2007). Remembering the past to imagine the future: the prospective brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 8, 657–661.
- Scharnowski, F., Rüter, J., Jolij, J., Hermens, F., Kammer T., Herzog, M. H. (2009). Long-lasting modulation of feature integration by transcranial magnetic stimulation. *Journal of Vision*, 9, 1–10.
- Schuster, S., Rossel, S., Schmidtman, A., Jäger, I., Poralla, J. (2004). Archer fish learn to compensate for complex optical distortions to determine the absolute size of their aerial prey. *Current Biology*, 14, 1565–1568.
- Schwab, S., Miller, J. L., Grosjean, F., Mondini, M. (2008). Effect of speaking rate on the identification of word boundaries. *Phonetica*, 65, 173–186.
- Seeyave, D. M., Coleman, S., Appugliese, D., Corwyn, R. F., Bradley, R. H., Davidson, N. S., Kaciroti, N., Lumeng, J. C. (2009). Ability to delay gratification at age 4 years and risk of overweight at age 11 years. *Archives of Pediatric & Adolescent Medicine*, 163, 303–308.

- Sellitto, M., Ciaramelli, E., di Pellegrino, G. (2010). Myopic discounting of future rewards after medial orbitofrontal damage in humans. *Journal of Neuroscience*, 30, 16429–16436.
- Sergent, C., Wyart, V., Babo-Rebelo, M., Cohen, L., Naccache, L., Tallon-Baudry, C. (2013). Cueing attention after the stimulus is gone can retrospectively trigger conscious perception. *Current Biology*, 23, 150–155.
- Sewell, R. A., Schnakenberg, A., Elander, J., Radhakrishnan, R., Williams, A., Skosnik, P. D., Pittman, B., Ranganathan, M., D'Souza, D. C. (2013). Acute effects of THC on time perception in frequent and infrequent cannabis users. *Psychopharmacology*, 226, 401–413.
- Shariff, A. F., Vohs, K. D. (2014). The world without free will. *Scientific American*, June, 77–79.
- Sharma, V. K. (2003). Adaptive significance of circadian clocks. *Chronobiology International*, 20, 901–919.
- Shepherd, G. M. (1998). The synaptic organization of the brain. New York: Oxford University.
- Shuler, M. G., Bear, M. F. (2006). Reward timing in the primary visual cortex. *Science*, 311, 1606–1609.
- Siegler, R. S., Richards, D. D. (1979). Development of time, speed, and distance concepts. *Developmental Psychology*, 15, 288–298.
- Smart, J. J. C., ed. (1964). Problems of space and time. New York: Macmillan.
- Smith, K. (2011). Neuroscience vs philosophy: taking aim at free will. *Nature*, 477, 23–25.
- Smolen, P., Hardin, P. E., Lo, B. S., Baxter, D. A., Byrne, J. H. (2004). Simulation of *Drosophila* circadian oscillations, mutations, and light responses by a model with VRI, PDP-1, and CLK. *Biophysical Journal*, 86, 2786–2802.
- Smolin, L. (2013). Time reborn: from the crises in physics to the future of the universe. New York: Houghton Mifflin Harcourt. В русском переводе: Смолин Л. Возвращение времени: от античной космогонии к космологии будущего. – АСТ, 2014.
- Sompolinsky, H., Crisanti, A., Sommers, H. J. (1988). Chaos in random neural networks. *Physical Review Letters*, 61, 259–262.
- Soon, C. S., Brass, M., Heinze, H.-J., Haynes, J.-D. (2008). Unconscious determinants of free decisions in the human brain. *Nature Neuroscience*, 11, 543–545.
- Spalding, Kirsty L., Bergmann, O., Alkass, K., Bernard, S., Saleh-pour, M., Huttner, H. B., Boström, E., Westerlund, I., Vial, C., Buchholz, B. A., Possnert, G., Mash, D. C., Druid, H., Frisén, J. (2013). Dynamics of hippocampal neurogenesis in adult humans. *Cell*, 153, 1219–1227.
- Stern, D. L. (2014). Reported *Drosophila* courtship song rhythms are artifacts of data analysis. *BMC Biology*, 12, 38.
- Stetson, C., Fiesta, M. P., Eagleman, D. M. (2007). Does time really slow down during a frightening event? *PLoS ONE*, 2, e1295.
- Stokes, Mark G., Kusunoki, M., Sigala N., Nili, H., Gaffan, D., Duncan, J. (2013). Dynamic coding for cognitive control in prefrontal cortex. *Neuron*, 78, 364–375.
- Suddendorf, T. (2013). The gap: the science of what separates us from other animals. New York: Basic Books.
- Suddendorf, T. (1997). Mental time travel and the evolution of the human mind. *Genetic, Social, and General Psychology Monographs*, 123, 133–167.
- Suddendorf, T., Corballis, M. C. (2007). The evolution of foresight: What is mental time travel, and is it unique to humans? *Behavior and Brain Sciences*, 30, 299–313; discussion 313–351.
- Summa, K. C., Turek, F. W. (2015). The clocks within us. *Scientific American*, January, 50–55.
- Surowiecki, J. (2013). Deadbeat governments. *The New Yorker*, Dec. 23, 46.

- Sussillo, D., Barak, O. (2013). Opening the black box: Low-dimensional dynamics in high-dimensional recurrent neural networks. *Neural Computation*, 25, 626–649.
- Swann, A. C., Lijffijt, M., Lane, S. D., Cox, B., Steinberg, J. L., Moeller, F. G. (2013). Norepinephrine and impulsivity: effects of acute yohimbine. *Psychopharmacology*, 229, 83–94.
- Taler, V., Baum, S. R., Chertkow, H., Saumier, D. (2008). Comprehension of grammatical and emotional prosody is impaired in Alzheimer’s disease. *Neuropsychology*, 22, 188–195.
- Taylor, M., Esbensen, B. M., Bennett, R. T. (1994). Children’s understanding of knowledge acquisition: the tendency for children to report that they have always known what they have just learned. *Child Development*, 65, 1581–1604.
- Terry, P., Doumas, M., Desai, R. I., Wing, A. M. (2008). Dissociations between motor timing, motor coordination, and time perception after the administration of alcohol or caffeine. *Psychopharmacology* (Berl.).
- Tessmar-Raible, K., Raible, F., Arboleda, E. (2011). Another place, another timer: Marine species and the rhythms of life. *BioEssays*, 33, 165–172.
- Thorne, K. S. (1995). Black holes and time warps: Einstein’s outrageous legacy. New York: W. W. Norton. В русском переводе: Торн К. Черные дыры и складки времени: Дерзкое наследие Эйнштейна. – Физматлит, 2008.
- Tinklenberg, J. R., Roth, W. T., Kopell, B. S. (1976). Marijuana and ethanol: Differential effects on time perception, heart rate, and subjective response. *Psychopharmacology*, 49, 275–279.
- Toh, K. L., Jones, C. R., He, Y., Eide, E. J., Hinz, W. A., Virshup, D. M., Ptáček, L. J., Fu, Y.-H. (2001). An hPer2 phosphorylation site mutation in familial advanced sleep phase syndrome. *Science*, 291, 1040–1043.
- Toida, K., Ueno, K., Shimada, S. (2014). Recalibration of subjective simultaneity between self-generated movement and delayed auditory feedback. *Neuroreport*, 25, 284–288.
- Tom, G., Burns, M., Zeng, Y. (1997). Your life on hold: The effect of telephone waiting time on customer perception. *Journal of Interactive Marketing*, 11, 25–31.
- Treisman, M. (1963). Temporal discrimination and the indifference interval: implications for a model of the ‘internal clock.’ *Psychological Monographs*, 77, 1–31.
- Tse, P. U., Intriligator, J., Rivest, J., Cavanagh, P. (2004). Attention and the subjective expansion of time. *Perception & Psychophysics*, 66, 1171–1189.
- Tulving, E. (1985). Memory and consciousness. *Canadian Psychologist*, 26, 1–12.
- Tulving, E. ed. (2005). Episodic memory and autonoesis: Uniquely human? New York: Oxford University Press.
- Van der Burg, E., Alais, D., Cass, J. (2015). Audiovisual temporal recalibration occurs independently at two different time scales. *Scientific Reports*, 5, 14526.
- Van Wassenhove, V. (2009). Minding time in an amodal representational space. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B Biological Science*, 364, 1815–1830.
- Van Wassenhove, V., Grant, K. W., Poeppel, D. (2007). Temporal window of integration in auditory-visual speech perception. *Neuropsychologia*, 45, 598–607.
- Vitaterna, M. H., King, D. P., Chang, A.-M., Kornhauser, J. M., Lowrey, P. L., McDonald, J. D., Dove, W. F., Pinto, L. H., Turek, F. W., Takahashi, J. S. (1994). Mutagenesis and mapping of a mouse gene, clock, essential for circadian behavior. *Science* (New York), 264, 719–725.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude: common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7, 483–488.
- Wearden, J. H. (2015). Passage of time judgments. *Consciousness and Cognition*, 38, 165–171.
- Wearden, J. H., Edwards, H., Fakhri, M., Percival, A. (1998). Why “sounds are judged longer than lights”: Application of a model of the internal clock in humans. *Quarterly Journal of Experimental Psychology Section B*, 51, 97–120.

- Wearden, J. H., O'Donoghue, A., Ogden, R., Montgomery, C. (2014). Subjective duration in the laboratory and the world outside. In: Subjective time: The philosophy, psychology, and neuroscience of temporality (Arstila, V, Lloyd, D, eds.), 287–306. Cambridge, MA: MIT Press.
- Weaver, D. R. (1998). The suprachiasmatic nucleus: A 25-year retrospective. *Journal of Biological Rhythms*, 13, 100–112.
- Wegner, D. M. (2002). The illusion of conscious will. Cambridge, MA: MIT Press.
- Weiner, J. (1999). Time, love, memory: A great biologist and his quest for the origins of behavior. New York: Vintage Books.
- Wells, R. B. D. (1860). Illustrated hand-book of phrenology, physiology, and physiognomy. London: H. Vickers.
- Welsh, D., Engle, E. R. A., Richardson, G., Dement, W. (1986). Precision of circadian wake and activity onset timing in the mouse. *Journal of Comparative Physiology A*, 158, 827–834.
- Weyl, H. (1949/2009). Philosophy of mathematics and natural science. Princeton: Princeton University Press. В русском переводе: Вейль Г. О философии математики. – КомКнига, 2005.
- Whiting, A., Donthu N. (2009). Closing the gap between perceived and actual waiting times in a call center: Results from a field study. *Journal of Services Marketing*, 23, 279–288.
- Wiener, M., Turkeltaub, P., Coslett, H. B. (2010). The image of time: A voxelwise meta-analysis. *Neuroimage*, 49, 1728–1740.
- Wilson, M. A., McNaughton, B. L. (1994). Reactivation of hippocampal ensemble memories during sleep. *Science*, 265, 676–679.
- Wise, S. P. (2008). Forward frontal fields: phylogeny and fundamental function. *Trends in Neurosciences*, 31, 599–608.
- Wiskott, L., Sejnowski, T. J. (2002). Slow feature analysis: unsupervised learning of invariances. *Neural Computation*, 14, 715–770.
- Wittmann, M., Paulus, M. P. (2007). Decision making, impulsivity and time perception. *Trends Cognitive Sciences*, 12, 7–12.
- Wood, J. N., Grafman, J. (2003). Human prefrontal cortex: processing and representational perspectives. *Nature Reviews Neuroscience*, 4, 139–147.
- Wright, B. A., Buonomano, D. V., Mahncke, H. W., Merzenich, M. M. (1997). Learning and generalization of auditory temporal-interval discrimination in humans. *Journal of Neuroscience*, 17, 3956–3963.
- Wright, B. A., Wilson, R. M., Sabin, A. T. (2010). Generalization lags behind learning on an auditory perceptual task. *Journal of Neuroscience*, 30, 11635–11639.
- Xuan, B., Zhang, D., He, S., Chen, X. (2007). Larger stimuli are judged to last longer. *Journal of Vision*, 7, 1–5.
- Yang, Y., Duguay, D., Bédard, N., Rachalski, A., Baquiran, G., Na, C. H., Fahrenkrug J., Storch, K.-F., Peng, J., Wing, S. S., Cermakian, N. (2012). Regulation of behavioral circadian rhythms and clock protein PER1 by the deubiquitinating enzyme USP2. *Biology Open* 1:789–801.
- Yarrow, K., Haggard, P., Heal, R., Brown, P., Rothwell, J. C. (2001). Illusory perceptions of space and time preserve cross-saccadic perceptual continuity. *Nature*, 414, 302–305.
- Zakay, D., Block, R. A. (1997). Temporal cognition. *Current Directions in Psychological Science*, 6, 12–16.
- Zantke, J., Ishikawa-Fujiwara, T., Arboleda, E., Lohs, C., Schipany, K., Hallay, N., Straw, A. D., Todo, T., Tessmar-Raible, K. (2013). Circadian and circalunar clock interactions in a marine annelid. *Cell Reports*. 2013; 5: 99–113.
- Zarco, W., Merchant, H., Prado, L., Mendez, J. C. (2009). Subsecond timing in primates: comparison of interval production between human subjects and rhesus monkeys. *Journal of Neurophysiology*, 102, 3191–3202.
- Zeh, H. D. (1989/2007). The physical basis of the direction of time. Berlin: Springer.

- Zhou, X., de Villers-Sidani, É., Panizzutti, R., Merzenich, M. M. (2010). Successive-signal biasing for a learned sound sequence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 14839–14844.
- Zimbardo, P., Boyd, J. (2008). *The time paradox*. New York: Free Press. В русском переводе: Зимбардо Ф., Бойд Дж. Парадокс времени. Новая психология времени, которая улучшит вашу жизнь. – Речь, 2010.
- Zucker, R. S. (1989). Short-term synaptic plasticity. *Annual Review of Neuroscience*, 12, 13–31.
- Zucker, R. S., Regehr, W. G. (2002). Short-term synaptic plasticity. *Annual Review of Physiology*, 64, 355–405.