

# Содержание

Введение .....	7
----------------	---

## **ЧАСТЬ I. ЗРЕНИЕ: ПЕРВЫЕ ШАГИ К ПОНИМАНИЮ**

<b>1</b>   Чудо восприятия .....	13
<b>2</b>   Нейроны, рассказывающие мозгу о внешнем мире .....	17
<b>3</b>   Микропроцессор в глазу .....	45
<b>4</b>   Нейроны-призраки .....	67
<b>5</b>   Что глаз сообщает мозгу? .....	93

## **ЧАСТЬ II. В ДЕБРЯХ МОЗГА**

<b>6</b>   Зрительные сигналы поступают в мозг .....	107
<b>7</b>   Что дальше: лоскутное одеяло зрительной коры .....	127
<b>8</b>   Пластичные чувства .....	141
<b>9</b>   Формирование нейронной сети: нейроны соединяются, если вместе возбуждаются .....	155
<b>10</b>   Машинное обучение, компьютерное зрение и живой мозг .....	181
<b>11</b>   Как работает зрение .....	205

### **ЧАСТЬ III. ДО САМОГО ГОРИЗОНТА И ДАЛЬШЕ**

<b>12</b>	Почему эволюция так любит нейронные сети . . . . .	225
<b>13</b>	Прогресс есть, тайны остаются . . . . .	231
<b>14</b>	Зрение и сознание . . . . .	247
	<i>Глоссарий</i> . . . . .	259
	<i>Благодарности</i> . . . . .	265
	<i>Примечания</i> . . . . .	267
	<i>Библиография</i> . . . . .	279
	<i>Источники иллюстраций</i> . . . . .	299
	<i>Об авторе</i> . . . . .	301

# Введение

Это книга о том, как мы видим. Мыслители издавна пытались объяснить феномен зрения, но их представления, как показывают современные исследования, были наивными: ведь глаз — это не просто съемочный аппарат, а нечто гораздо большее. Наша способность узнавать лица друзей кажется элементарной и естественной — настолько, что древние даже не рассматривали ее как предмет исследования, — но на деле в ней нет ничего очевидного. Чтобы дать исчерпывающий ответ на вопрос, что такое зрение, надо понять не только то, как функционируют наши глаза. Необходимо также знать, как наш мозг воспринимает и осмысляет внешний мир.

Как это ни парадоксально, мозг очень медлителен: нейроны и синаптические связи между ними функционируют в миллионы раз медленнее современных компьютеров. Однако он превосходит компьютеры в большинстве перцептивных задач. Мы можем за тысячные доли секунды узнать своего ребенка в толпе мальчиков и девочек на детской площадке. Как наш мозг это делает? Каким образом он перерабатывает и осмысляет потоки элементарных стимулов — пятен света, вибраций воздуха, давлений на кожу и т. п.? На сегодняшний день у нас есть только проблески понимания, но от того, что уже известно, захватывает дух.

Я пришел в нейронауку в 25 лет — еще до того, как она стала самостоятельной официальной дисциплиной, — и сегодня увлечен ею так же страстно, как и тогда. Я наблюдал за развитием нейронауки и принимал в нем непосредственное участие. Эту книгу я написал, чтобы рассказать вам о том, как работает зрение — от сетчатки до зрительных центров в височной коре мозга. Но еще я хочу пригласить вас в научное путешествие, чтобы вы узнали, как работают нейробиологи, не из скучных научных статей или ток-шоу, а увидели это своими глазами — побывав в настоящих исследовательских лабораториях. Наконец, я познакомлю вас с несколькими ключевыми фигурами в этой области.

Мы шаг за шагом рассмотрим процесс зрительного восприятия. Вы узнаете, что мы видим мир вовсе не таким, какой он есть на самом деле: наша сетчатка разбивает его на множество отдельных фрагментов (сигналов) и посылает их в мозг по отдельным каналам, каждый из которых несет информацию об одном небольшом аспекте изображения. Я объясню, как нейроны сетчатки выполняют это перекодирование и почему. Затем мы проследуем за этими сигналами в мозг и посмотрим, как из них формируется восприятие.

В мозге по-прежнему еще множество тайн, но мы уже смогли прийти к важному выводу: большая часть мозга работает не как система фиксированных двухточечных соединений наподобие телефонной сети, а как паутина бесчисленных нейронных связей, то есть как нейронная сеть. В наши дни нейронные сети обычно ассоциируются с компьютерами, но их идея впервые была выдвинута более полувека назад прозорливым канадским нейробиологом Дональдом Хеббом. Несколько лет спустя эту теорию подхватили специалисты в области теории вычислительных систем. В последующие десятилетия нейронные сети то входили в моду, то теряли популярность, но более совершенные компьютеры в конечном итоге привели к рождению новой области искусственного

интеллекта (ИИ), известной как машинное обучение. Разработчики ИИ показали, что компьютерные нейронные сети могут научиться впечатляющим вещам, и тем самым побудили нейробиологов вновь посмотреть на головной мозг сквозь призму нейронных сетей. Сегодня у нас есть замечательный альянс нейробиологии и компьютерных наук, в котором каждая дисциплина служит источником идей для другой.

Действительно ли мозг использует нейронные сети для восприятия и осмысления мира? Функционирует ли он согласно принципам, применяющимся в «машинном обучении»? Ответ, судя по всему, да — и мозг делает это намного лучше компьютеров. Безусловно, компьютеры поражают нас некоторыми своими способностями — не только игрой в шахматы, но и выполнением других более сложных задач. Но по большому счету они как цирковые пони, умеющие делать только один трюк. И даже самые простые системы ИИ требуют большого количества оборудования и, как следствие, большого количества энергии. В отличие от них, наш скромный по размерам мозг способен выполнять огромное разнообразие задач, потребляя при этом меньше энергии, чем ночник для чтения. С этой точки зрения компьютеры очень примитивны, поэтому цель — сделать их хотя бы немного похожими на человеческий мозг.

Как это давно понял Дональд Хебб, нейронная сеть с фиксированными соединениями неспособна учиться. Ключ к обучаемости нейронной сети (биологической или искусственной) — в способности синаптических связей между ее нейронами меняться под влиянием опыта. Такая пластичность — общее правило для всего мозга, а не только для сенсорных систем. Благодаря ей мозг может оправляться от повреждений и выделять дополнительные ресурсы под особенно важные задачи. В зрительной системе нейронные сети могут научиться заранее идентифицировать визуальный объект, дополняя сенсорную информацию, поступающую

с сетчатки, знаниями об увиденных ранее аналогичных объектах. Это означает, что значительная часть нашего восприятия — не столько фиксированная, сколько приобретенная в результате обучения реакция на зримый объект. Нейронные сети распознают определенные комбинации признаков, когда они их видят.

Куда это приведет нас в наших поисках понимания механизмов восприятия, мышления, эмоций? Конкретные детали нам неизвестны, но мы можем заглянуть в далекое будущее и попробовать увидеть ответ. Это будут фактологические, поддающиеся проверке научные знания в каждой точке. В этой книге мы с вами пройдем часть пути — до того места, где сенсорный опыт превращается в восприятие и мысль.

Наконец, где во всем этом наше «я»? Легко говорить о мозге с позиции внешнего наблюдателя, но что представляет собой — и где обитает — тот «внутренний человек», который смотрит на мир нашими глазами? Задумываясь об этом, мы неизбежно наталкиваемся на вопрос о природе сознания, нашего «я», а на этом пути мы, люди, едва ли сделали первые шаги. Я затрону эту тему в конце книги, не давая ответов, но постаравшись чуть более четко обозначить проблему.

# ЧАСТЬ I

## ЗРЕНИЕ: ПЕРВЫЕ ШАГИ К ПОНИМАНИЮ

В 1960-х гг. в Гарвардском университете уважаемый профессор Джейкоб Бек читал курс, незатейливо назвавшийся «Восприятие». Лекции проходили в небольшой аудитории, втиснутой в углу Мемориального холла — величественного готического здания из темно-красного кирпича, возведенного в XIX в. в память гарвардцев, погибших в Гражданской войне. Около сотни коричневых деревянных столов, покрытых за прошедшее столетие бесчисленными слоями пожелтевшего лака, ступенчато спускались к огромной черной доске, которая занимала всю переднюю стену. Через редкие окна, расположенные высоко на левой стене, виделось холодное небо, но лампы накаливания заливали теплым желтым светом аудиторию, в которой находилось 30–40 студентов.

Манера преподавания Бека была такой же простой и ясной, как и название его курса. Он придерживался классического стиля, считая, что его главная задача — четко и организованно изложить учебный материал, а не увлечь студентов. В ходе лекций он пользовался тщательно подготовленными

конспектами и в начале каждого занятия обязательно уделял несколько минут тому, чтобы повторить основные моменты предыдущей лекции.

Впрочем, Беку и не надо было вести себя как шоумен. Материал захватывал сам по себе. Разумеется, Бек преподавал нам основы: давление на кожу деформирует нервные окончания, которые посылают сигнал через спинной мозг в головной. Одни наши кожные рецепторы реагируют на прикосновения, другие — на тепло, третьи — на движение по коже, например, когда вы гуляете по лесу и вдруг чувствуете, что у вас по руке ползет неизвестное (и, возможно, ядовитое) насекомое. Такого рода факты любого могли заинтересовать. Но самой удивительной проблемой, которой Бек озадачил нас, 19-летних, была проблема распознавания объектов.

С одной стороны, она непосредственно связана со зрительным восприятием: как работает глаз, как он подает сигнал в мозг. Но не только. Здесь играют роль куда более сложные феномены, такие как мышление, память, природа сознания. Сегодня мы более-менее представляем себе, как работает наша сенсорная система. Мы научились регистрировать прохождение электрических сигналов по чувствительным проводящим путям. Научились стимулировать нейроны, что позволяет нам все больше узнавать об их работе и функциях. Мы многое узнали о том, как обрабатываются сенсорные сигналы в головном мозге и как они передаются между различными его отделами. Таким образом, у нас появились надежные базовые знания, опираясь на которые мы можем двигаться дальше по пути, на котором мы только-только начинаем делать первые шаги, — по пути к пониманию того, как мыслит наш мозг. И изучение феномена нашего зрения обещает по крайней мере частично приподнять завесу над великими тайнами.



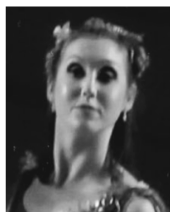
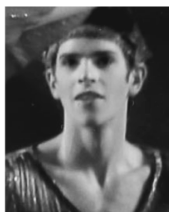
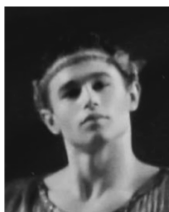
## 1 | Чудо восприятия

Груши — не скрипки,  
Не обнаженные тела, не бутылки.  
Они ни на что не похожи.

Они — желтые формы,  
Сотворенные из изгибов,  
Бочковатые книзу,  
Чуть тронутые красным.

УОЛЛЕС СТИВЕНС

Взгляните на эти три лица. Хотя фотографии несколько размыты и неконтрастны, вы легко можете распознать, кто на них изображен: справа — женщина (у нее более округлое лицо); в центре — мальчик (у него явно мужской подбородок). Будь они вашими сыном или дочерью, братом или матерью, другом или подругой или любым другим близким человеком, вы бы узнали их в любом виде и в любой ситуации, в профиль и анфас, при ярком свете и в сумерках,



вблизи и издалека, радостными, грустными, смеющимися или молчаливыми.

Задумывались ли вы когда-нибудь о том, *как* вы это делаете? Каждый раз на вашу сетчатку падают фактически разные изображения. Ваш мозг приспосабливается к каждому изображению — крупному либо мелкому, яркому либо тусклому, с улыбкой или нахмуренными бровями. Число различных версий лица — как физического раздражителя, воспринимаемого вашей сетчаткой, — практически бесконечно. Однако же мы узнаем знакомые лица мгновенно и без усилий. И мы способны различать не три лица, а сотни и тысячи. Каким же образом нашему мозгу, который, по сути, является всего лишь природным аппаратом, как и все остальное в нашем теле, удастся так хорошо справляться с этой задачей?

Давайте начнем с более простого примера. Представьте, что вам нужно разработать компьютерную программу, способную распознавать букву **A**. Современные компьютеры справляются с этим легко, не так ли? Но это всего лишь видимость — компьютеры нас обманывают (через пару абзацев я объясню, почему так говорю).

Решение кажется очевидным: в компьютере (или в мозге) должен иметься шаблон или образец буквы **A**. Компьютер (или мозг) сравнивает распознаваемую букву с образцом буквы **A** и делает вывод об их сходстве или различии. Но что, если размер распознаваемой **A** отличается от размера шаблонной **A**? Их сопоставление покажет, что это разные буквы.

Хорошо, значит, в компьютерную программу необходимо включить все множество шаблонов буквы **A** разного размера:



Окей, проблема с несхожими размерами решена. Но предположим, что распознаваемая буква **A** немного наклонена

влево: **A + A → A**. Накренившаяся буква снова не будет совпадать ни с одним из имеющихся шаблонов.

Чтобы решить эту проблему, мы включаем в программу набор шаблонов буквы **A** всех возможных размеров со всеми возможными углами наклона. Если компьютер достаточно мощный, эта программа может работать достаточно быстро. Но как насчет остальных параметров, таких как толщина линии, цвет, шрифт и т. д.? Мало того: число комбинаций, которые в итоге нужно проверить компьютеру, — все возможные размеры, *умноженные* на все возможные углы наклона, *умноженные* на все возможные свойства шрифта, *умноженные* на все возможные цвета, и т. д. Это количество становится очень большим, слишком большим с практической точки зрения. И вся морока ради того, чтобы распознать одну-единственную букву!

С лицами число вариантов и вовсе нет предела. Лицо может улыбаться или хмуриться, быть ярко освещенным или находиться в тени, быть видимым в профиль или анфас. А элементы нашего мозга — нейроны и синапсы — работают очень неспешно по сравнению с современными компьютерами. Передача самого базового сигнала через синапс между контактирующими нейронами занимает около тысячной доли секунды. За это время мощный компьютер успевает выполнить почти миллион операций. Именно благодаря такой сверхчеловеческой скорости компьютеры и могут обманывать нас, делая то, на что неспособен ни один живой биологический организм. Если предположить, что сравнение по одному из параметров состоит из ста операций, то, пока наш мозг передает через синапс один нервный импульс, компьютер успевает сравнить тысячу параметров. И это без учета времени прохождения сигнала по соединяющим нейроны нервным волокнам (аксонам)! Если бы наш старина мозг работал по тому же принципу, что и компьютеры, ему требовались бы минуты, чтобы распознать даже хорошо зна-

комое лицо. Короче говоря, перебор вариантов — не вариант для нашего мозга.

Вот пример, связанный с другим восприятием — слуховым<sup>1</sup>. Возьмем так называемый феномен сегментации. Если кто-то вам скажет: «Вон бежит синяя собака» — вы услышите то, что будет примерно соответствовать написанному выше. Но на самом деле в обычной устной речи мы не делаем пауз между словами (не считая тех случаев, когда мы выделяем каждое слово намеренно). С акустической точки зрения вы слышите эту фразу как один непрерывный звуковой поток: «Вонбежитсиняясобака». Чтобы осмыслить ее, наш мозг разбивает эту длинную последовательность звуков на отдельные знакомые нам слова.

И снова очевидно, что мозг делает это не путем сопоставления слов с некими шаблонами. Сколько звуков должны были бы включать такие шаблоны? Сколько словесных форм? Разумеется, гораздо больше, чем в словаре. И это не говоря уже о разных акцентах, темпах речи, фоновом шуме и многом другом...

Эта загадка — способность, которую мы с такой легкостью используем по многу раз на день, — и есть то, что мы называем проблемой распознавания объектов. Хотя ее принято рассматривать в основном как проблему восприятия, здесь также задействована память: чтобы распознать объект, нам нужно сопоставить текущий раздражитель с воспоминаниями о соответствующих объектах, с которыми мы сталкивались в прошлом. Выяснить, как это работает, — захватывающая научная задача, Эверест сенсорной нейробиологии.

## 2 | Нейроны, рассказывающие мозгу о внешнем мире

Мы изучаем общее  
через изучение конкретного.

СТИВЕН КУФЛЕР

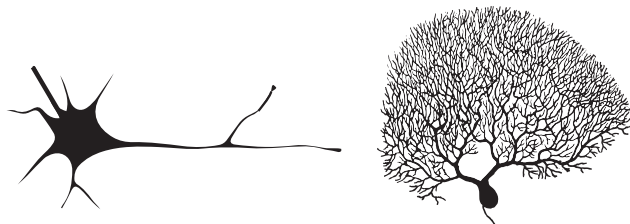
Как я уже предупредил вас, мир, который мы видим, — вовсе не тот мир, что существует на самом деле. Наша сетчатка анализирует воспринимаемое визуальное изображение, выделяет в нем наиболее значимые компоненты, какие-то из них модифицирует и посылает десятки отдельных потоков сигналов о каждом из них в наш мозг, который собирает из них «видимую» нами картину миру. Все остальное рассматривается как фоновый шум и игнорируется. Такое упрощение сенсорной сигнализации — не просто эволюционная прихоть, а один из наиболее фундаментальных принципов всего восприятия, главная цель которого — экономия.

Чтобы понять, как это работает, давайте начнем с основ.

### НЕЙРОН

Нейрон — штука довольно простая. Это крошечный физический объект, состав которого нам понятен. Он включает в себя те же компоненты, которые входят в любую живот-

ную клетку, но которые, однако, имеют ряд уникальных особенностей. Когда несколько сотен миллионов нейронов объединяются в сеть, происходят поистине фантастические вещи: мы, владельцы этой нейронной сети, можем узнавать друзей, наслаждаться музыкой Бетховена или ловить мяч одной рукой с расстояния 27 м.



Нейрон, как и все клетки позвоночных, представляет собой мешочек с внутриклеточной жидкостью, отделенный от окружающей среды тонкой эластической мембраной. Одни нейроны похожи на детские воздушные шарик. Форма других более сложна: они походят на амёб. Третьи и вовсе поражают своим причудливым строением. Большинство нейронов напоминают голые деревья зимой с многочисленными ветвями и веточками — с помощью этих отростков они соединяются с другими нейронами, своими ближайшими и дальними соседями. Но при всей замысловатости форм нейрон, как и любая другая клетка, состоит из единого внутреннего пространства, заключенного в границы мембраны — даже если местами эта мембрана напоминает не привычный мыльный пузырь, а тончайшие изогнутые трубочки для напитков.

Что же представляет собой клеточная мембрана? Она состоит из липидов — разновидности жиров, которые, как известно, не смешиваются с водой. Благодаря этому мембрана и выполняет свою барьерную функцию между внутренней и внешней водными средами. Но сама по себе эта липидная оболочка мало что может делать. В лабораторных

условиях можно создать искусственную клетку, имеющую одну только клеточную мембрану, но такая клетка будет лежать мертвым грузом. Настоящая клеточная мембрана усеяна мириадами крошечных молекулярных машин, каждая из которых выполняет свою конкретную задачу — например, один из видов встроенных в нее белковых молекул открывает «ворота» (каналы), пропуская внутрь клетки и из нее потоки заряженных частиц (ионов). Этот механизм лежит в основе передачи нервного импульса.

Нервные клетки выполняют множество функций, но главная из них — та, что отличает их практически от всех остальных клеток, — коммуникация с другими нейронами. В большинстве случаев они делают это посредством передачи коротких электрических импульсов, или спайков. Эти импульсы могут передаваться как на короткие, так и на очень длинные расстояния. Некоторые нейроны поддерживают коммуникацию (мы говорим: «Обмениваются нервными импульсами») только со своими ближайшими соседями. Эти так называемые интернейроны (вставочные нейроны или нейроны локальной сети) передают сигналы на расстояние до 10 микрометров, то есть всего до одной сотой миллиметра (1 мкм равен 0,001 мм). Для сравнения: некоторые нервные импульсы проходят путь от головного мозга до нижней части спинного мозга, когда вы пытаетесь пошевелить большим пальцем ноги, или в обратном направлении, если вы больно бьетесь ногой о лежащий на земле камень.

Нервные импульсы передаются через нейроны совсем не так, как электрический ток, текущий по медным проводам. Это гораздо более сложный биологический процесс, и в нем активно участвует клеточная мембрана: передача электрического импульса происходит за счет быстрого колебания мембранного потенциала, которое возникает в результате перемещения потоков ионов внутрь клетки и из нее через встроенные в мембрану специализированные белковые моле-

кулы (ионные каналы). Вот почему передача импульсов происходит довольно медленно по сравнению с течением электрического тока. В зависимости от типа аксона скорость распространения по нему нервного импульса составляет от 10 до 100 м/сек, тогда как электричество бежит по проводам со скоростью около 300 млн м/сек. Такая низкая проводимость ограничивает вычислительную мощность нашего мозга и является основной причиной того, почему он не может использовать для решения проблем простые стратегии перебора, основанные на грубой вычислительной силе.

На конце аксона обычно находится синапс. Это место контакта, через которое нейроны общаются друг с другом. Возникший в синапсе нейрона электрический сигнал преобразуется в химический: под воздействием спайка специальный синаптический механизм выбрасывает в пространство между двумя синапсами (синаптическую щель) особые химические вещества, которые воспринимаются синапсом другого нейрона. Эти химические передатчики сигналов называются нейромедиаторами или трансммиттерами. Поскольку существует очень много разных типов нейромедиаторов, которые используются для разных целей в разных отделах мозга, а также благодаря тому, что механизм их выработки включает множество шагов, мы имеем возможность вмешиваться в этот процесс и в какой-то степени манипулировать функционированием мозга — с терапевтическими целями или ради удовольствия<sup>1</sup>. Например, мы можем воздействовать на синапсы с помощью нейролептиков, противоэпилептических препаратов, валиума, помогающего нам успокоиться, прозака, делающего нас счастливыми, а также хорошо известного всем никотина.

Выбрасываемые нейроном нейромедиаторы могут быть возбуждающими или тормозящими — могут повышать или понижать активность воспринимающего их нейрона. (В реальности нейрон редко подвергается воздействию только



одного типа нейромедиаторов, но сейчас для простоты обсуждения давайте предположим, что это так.) Второй нейрон интегрирует все получаемые им входные сигналы, и, если за короткое время количество определенных сигналов превышает определенный порог, в нем возникает волна возбуждения — «потенциал действия». Этот потенциал действия распространяется по нейрону и передается дальше третьему нейрону, приводя к его возбуждению или торможению, и т. д.

На этом этапе мы видим вторую важную функцию нейронов: они решают, какие сигналы передать другим нейронам, а какие не пропустить дальше. Это решение принимается ими, как уже было сказано, путем объединения всех получаемых входных сигналов. Проще говоря, они складывают все возбуждающие сигналы и исключают из них все тормозящие. Разумеется, это очень упрощенная картина, учитывая все разнообразие входящих сигналов и факторов, влияющих на их действие. Изучением этого процесса занимается отдельная область нейробиологии: некоторые из умнейших моих коллег посвятили свою жизнь исследованию многочисленных и удивительных способов синаптической коммуникации.

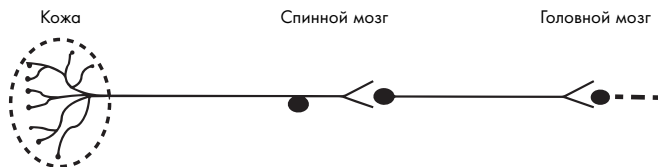
Итак, базовая функция нейрона — ждать поступления химических входных сигналов и, когда эти сигналы достигают определенной величины, генерировать потенциал действия, чтобы передать нервный импульс. Но простая передача импульсов от нейрона к нейрону не делает мозг мозгом. Чтобы мозг был мозгом, необходимо, чтобы нейроны принимали решения о том, какие сигналы передавать дальше, а какие нет. Разумеется, я сильно упрощаю, потому что моя цель — рассказать вам о восприятии. А для этого вам нужно знать всего несколько ключевых вещей и прежде всего то, что потенциал действия вызывает изменение электрического заряда на своем пути и мы, простые смертные, можем отследить этот электрический импульс, или спайк, при помощи тончайших длинных зондов, называемых микроэлектродами.

## КАК СЕНСОРНЫЕ НЕЙРОНЫ ПЕРЕДАЮТ СИГНАЛЫ

Как было сказано выше, нейроны могут передавать сигналы на короткие и очень длинные расстояния. Например, у жирафа нейроны, отвечающие за ходьбу и соединяющие головной мозг с нижним отделом спинного мозга, могут достигать в длину 2,5 м. Но во всех случаях (за редкими исключениями) способ передачи сигнала одинаков: воздействие раздражителя в каком-либо месте на поверхности клетки приводит к возникновению электрического импульса (потенциала действия), который распространяется по нейрону и передается дальше.

Все нейроны, отвечающие за восприятие внешнего мира — будь то через осязание, слух, зрение, вкус или обоняние, — по сути, делают одно и то же: они регистрируют событие и передают сигнал о нем — иногда через один-два вставочных нейрона — в головной мозг. Но совершают они это довольно разными способами, поскольку воспринимаемые ими внешние события также являются очень разными по своей физической природе.

Возьмем осязание. Тактильные ощущения возникают в результате деформации кожи под давлением. Эти деформирующие давления могут быть разными по силе — от удара о твердый предмет до легкого поглаживания (мы способны почувствовать даже невесомого комара, осторожно севшего нам на руку), — и все они воспринимаются нервными окончаниями, которые расположены под поверхностью кожи и являются частью нейронов.



На рисунке показаны два нейрона на проводящем пути тактильной чувствительности; участок кожи, обозначенный пунктирной линией, называется рецептивным полем (соответственно сенсорная информация на схеме перемещается слева направо). Первый нейрон имеет длинный отросток (аксон), идущий от кожи — где он разветвляется на множество тончайших нервных окончаний — к спинному мозгу. Когда вам на руку садится комар, его ноги слегка давят на кожу над нервным окончанием. Нейрон регистрирует это давление и генерирует нервный импульс. Импульс проходит по аксону через тело клетки и доходит до синапса (на рисунке обозначен раздвоенной линией), соединенного со вторым нейроном, который находится в спинном мозге и передает сигнал дальше в головной мозг. (Существуют и другие пути передачи сигналов в мозг. Это один из самых простых.)

Тактильные нервные окончания обнаруживают давление на поверхности кожи при помощи механочувствительных ионных каналов — специальных белковых молекул, встроенных в клеточную мембрану. Под воздействием даже небольшой деформации механочувствительный канал открывается и пропускает внутрь клетки поток положительно заряженных ионов. Ионный ток возбуждает нервное окончание, вернее, его мембрану, и, когда возбуждение достигает определенного порогового значения, на мембране возникает потенциал действия. Он распространяется по мембране аксона сенсорного нейрона и идет дальше клеточного тела к спинному мозгу, где сигнал передается через синапс второму нейрону и проводится им в головной мозг для обработки. Кожный сенсорный нейрон сообщает остальной нервной системе три вида информации: что-то прикасается к вашей коже; место прикосновения находится чуть выше правого запястья и это что-то довольно легкое.

Начнем с вопроса «Где?». Определить место воздействия раздражителя очень просто. Нервные окончания каждого

тактильного нейрона охватывают конкретный ограниченный участок кожи, который может быть совсем крошечным, например, на руке или губе, или довольно большим, скажем, на спине. Поскольку мозг знает, где расположено рецептивное поле каждого нейрона, он мгновенно определяет, где именно происходит воздействие раздражителя<sup>2</sup>. Очевидно, что на кончике пальца, густо усеянном крошечными нервными окончаниями, локализация происходит гораздо точнее, чем на спине, где нервных окончаний намного меньше и каждый нейрон отвечает за гораздо больший по площади участок кожи.

«Рецептивное поле» является важным понятием в науке о восприятии. На нашем рисунке рецептивное поле, охваченное терминальными веточками (нервными окончаниями) аксона сенсорного нейрона, представляет собой очерченный пунктирной линией овал. Здесь это участок кожи, воздействие на который приводит к возбуждению конкретного осязательного нейрона. Как вы увидите дальше, точно так же устроена и система зрительного восприятия: под рецептивным полем понимается участок сетчатки, возбуждающий конкретный зрительный нейрон на уровне самой сетчатки или на других уровнях зрительной системы.

Второй вопрос — «Насколько сильно?», то есть какова интенсивность стимула. Каким образом кожный сенсорный нейрон сообщает головному мозгу, что воздействие раздражителя является слабым или сильным? Все сенсорные нейроны — осязательные, слуховые, зрительные, обонятельные или вкусовые — кодируют эту информацию в виде частоты потенциалов действия. Легкое прикосновение генерирует всего несколько потенциалов действия, более сильное — быструю и частую последовательность таких импульсов. Благодаря этому наш мозг — или же исследователь, регистрирующий скорость активации нейронов, — может определить интенсивность воздействия раздражителя.

Многие ученые, включая меня, выдвинули предположение, что в конкретных паттернах потенциалов действия может быть закодирована дополнительная информация аналогично тому, как это делается в азбуке Морзе<sup>3</sup>. Этот паттерн может сообщать мозгу, например, о том, от какого типа рецептора данного аксона поступает сигнал (смотрите следующий параграф). Само собой разумеется, характер паттерна влияет на реакцию мозга: известно, что импульсы с короткими интервалами между ними возбуждают постсинаптические клетки намного сильнее, чем импульсы с более длинными интервалами. Тем не менее никто пока не предложил и не исследовал конкретную расшифровку этого кода.

Третий вопрос «Что?», пожалуй, самый интересный. Мозгу важно знать: «Что прикоснулось к моему запястью?» Не все прикосновения одинаковы, поэтому существует несколько разных типов осознательных нейронов, реагирующих на различные виды внешнего воздействия. Один тип тактильных рецепторов умеренно чувствителен к легким прикосновениям к поверхности кожи и посылает сигналы в мозг на протяжении всего времени, пока длится прикосновение. Другой тип рецепторов реагирует только на довольно сильное давление и только на его изменения — он посылает сигналы в мозг, когда давление начинается и когда заканчивается. На сегодняшний день нам известно более дюжины видов первичных осознательных нейронов. Каждый из них можно проверить на приеме у невролога — что, собственно говоря, он и делает, когда колет вас иголкой или прикасается к вам вибрирующим камертоном.

Интересно, что многие различия между кожными рецепторами обусловлены не фундаментальными различиями в их строении, а разными структурами, в которые встроены их нервные окончания. Нервные окончания осознательных нейронов окружены специализированными клеточными

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

[e-Univers.ru](http://e-Univers.ru)