

Содержание

Введение	7
----------------	---

ЧАСТЬ I. ЗРЕНИЕ: ПЕРВЫЕ ШАГИ К ПОНИМАНИЮ

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

ЧАСТЬ II. В ДЕБРЯХ МОЗГА

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

ЧАСТЬ III. ДО САМОГО ГОРИЗОНТА И ДАЛЬШЕ

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

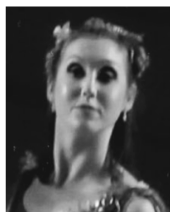
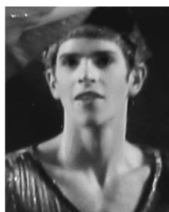
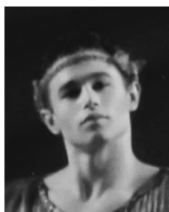
1 | Чудо восприятия

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 числу 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 — слуховым¹. 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: «Вонбежитсинясобака». 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 КУФФЛЕР

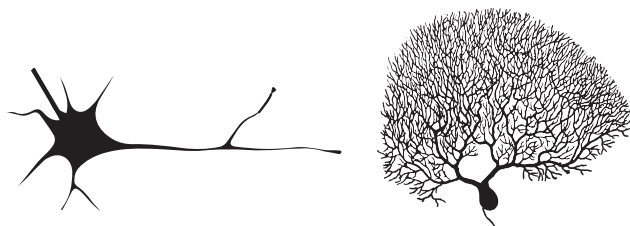
Как я уже предупредил вас, мир, который мы видим, — вовсе не тот мир, что существует на самом деле. Наша сетчатка анализирует воспринимаемое визуальное изображение, выделяет в нем наиболее значимые компоненты, какие-то из них модифицирует и посылает десятки отдельных потоков сигналов о каждом из них 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 удовольствия¹. 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.

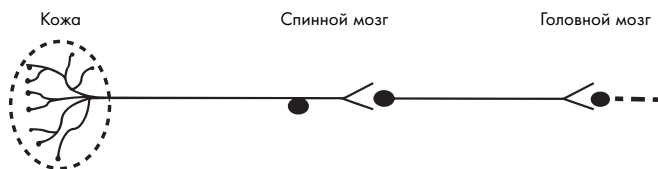
Итак, базовая функция нейрона — ждать поступления химических входных сигналов и, когда эти сигналы достигают определенной величины, генерировать потенциал действия, чтобы передать нервный импульс. Но простая передача импульсов от нейрона к нейрону не делает мозг мозгом. Чтобы мозг был мозгом, необходимо, 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 раздражителя². 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 Морзе³. 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

структурами, которые и определяют, на какие виды прикосновений реагирует осязательный нейрон. Представьте себе барабанные палочки для малого барабана и бас-барабана. Они отличаются между собой только тем, что у первых на ударном конце находится маленький деревянный шарик, а у вторых на этот шарик надет большой меховой наколочник. Из-за этого при ударе о натянутую кожу барабана они издают очень разные звуки. Кроме того, разнообразие реакций рецепторов обеспечивается и различиями в ионных каналах на их мембране. Эти детали, хотя и свидетельствуют об удивительном мастерстве эволюции, не особенно важны для нашего обсуждения. А важно то, что разные типы нейронов реагируют на разные внешние воздействия: одни способны почувствовать прыжок блохи, а другие реагируют лишь на удар кулаком. Разумеется, между этими крайностями существует множество промежуточных вариантов, и в большинстве случаев сигналы о воздействии стимула передаются в мозг смесью разных типов нейронов. Как замечательно выразился один из моих коллег, «подобно отдельным инструментам в оркестре, каждый подтип [осязательных нейронов] сигнализирует о той или иной конкретной характеристике действующего на кожу стимула, что в совокупности создает симфонию нервных импульсов, которые интерпретируются мозгом как осязательное ощущение»⁴.

Это общий принцип функционирования всех сенсорных систем. Вкусовая система включает набор из пяти типов рецепторов, отвечающих за восприятие сладкого, кислого, соленого, горького вкусов, а также умами (сложного вкуса, присущего некоторым аминокислотам). Примечательно, что на сегодняшний день ученые насчитали в обонятельной системе около 400 типов рецепторов, каждый из которых обладает избирательной чувствительностью к конкретному пахучему веществу. Это объясняет способность дегустаторов различать сотни видов вин по их букету (к сожалению,

я не обладаю этим талантом), а также то, почему аромат конкретных духов или одеколона способен вызвать воспоминания о бывшей любви.

ЧЕМ ЗРЕНИЕ ПОХОЖЕ НА ОСЯЗАНИЕ?

В предыдущем разделе я так подробно остановился на осязании, потому что основные принципы работы нашей осязательной и зрительной систем очень похожи. Их сенсорные нейроны, по сути, делают одно и то же. И зрение, и осязание сводятся к тому, чтобы передать в мозг информацию о стимулах, воздействующих на определенный участок пласта сенсорных клеток — в коже или сетчатке. Обе системы состоят из разнообразных типов рецепторов. В той и другой индивидуальные нейроны реагируют на стимулирование ограниченного рецептивного поля и сообщают мозгу конкретные виды информации. Но что касается зрения, то здесь мы знаем намного больше о том, как головной мозг принимает, обрабатывает и интерпретирует сигналы, поступающие от сетчатки глаза.

Как было сказано выше, отдельные иннервирующие кожу нейроны сообщают мозгу разные виды информации о воздействующих на них стимулах. Этот же фундаментальный принцип лежит в основе работы зрительной системы: каждое волокно зрительного нерва передает в мозг информацию об одном небольшом участке и одном конкретном аспекте видимого мира.

Сетчатка, по сути, представляет собой микропроцессор, подобный тому, что находится в вашем смартфоне, фотоаппарате или электронных часах. Она содержит множество разных типов нейронов, о которых дальше мы поговорим очень подробно. А пока давайте посмотрим, как сигналы с сетчатки передаются в головной мозг. Это делается посредством нейронов дальней связи, называемых ганглионарными

клетками сетчатки (и аналогичных осязательным нейронам, идущим от кожи к спинному мозгу). Сетчатка человеческого глаза содержит около миллиона ганглионарных клеток. Они собирают входные сигналы от нескольких типов внутренних нейронов сетчатки и посылают их в мозг через зрительный нерв, который образован из соединенных в пучок длинных аксонов ганглионарных клеток.

Первое серьезное исследование ганглионарных клеток сетчатки было предпринято американским ученым венгерского происхождения Стивеном Куффлером. Хотя научный интерес Куффлера был сосредоточен на другом предмете — а именно на механизме синаптической передачи, судьба в какой-то момент свела его с офтальмологией. Немало попутешествовав по миру, после Второй мировой войны он получил место на кафедре офтальмологии Университета Джонса Хопкинса. Отчасти из благодарности к своим работодателям он провел экспериментальное исследование, которое по сей день остается фундаментальным для нашего понимания феномена зрения.

Примерно в 1950 г. Куффлер занялся изучением электрической активности одиночных ганглионарных клеток в сетчатке глаз кошек, находящихся под воздействием глубокого наркоза. Исследователи вводили в глаз животного микроэлектрод, подводили его к ганглионарной клетке, после чего регистрировали генерируемые клеткой последовательности импульсов при стимуляции поверхности сетчатки пятнами света. Пятна света должны были быть очень мелкими, чтобы имитировать изображения объектов внешнего мира, которые, как известно, отображаются на сетчатке в сильно уменьшенном виде — например, изображение моего ногтя большого пальца на расстоянии вытянутой руки на сетчатке не превышает в размере 0,4 мм.

Куффлер заметил, что сигналы ганглионарных клеток сетчатки очень похожи на сигналы сенсорных нейронов кожи.

Каждая ганглионарная клетка отвечала за один небольшой участок поверхности сетчатки — свое рецептивное поле. Самая маленькая рецептивная зона в кошачьем глазу имела размер около 40 мкм или 0,04 мм. Хотя никто никогда не измерял (по медицинским соображениям) размер отдельных рецептивных полей у людей, косвенные свидетельства указывают на то, что их минимальный диаметр составляет около 10 мкм. Как рассчитал один лауреат Нобелевской премии, 10-микрометровое рецептивное поле соответствует изображению 25-центовой монеты, полученному с расстояния около 150 м. Лично я не способен увидеть четвертак, находящийся так далеко, но, возможно, у нобелевских лауреатов более острое зрение, чем у простых смертных. Рецептивные поля можно сравнить с пикселями на компьютерном мониторе. Чем больше плотность ганглионарных клеток, тем острее зрение.

НЕМНОГО КОНТЕКСТА

На заре нейробиологии — примерно с 1945 по 1980 г. — самые захватывающие исследования проводились в области регистрации электрических сигналов. Эти сигналы включали мозговые волны, которые записывались с помощью наложенных на поверхность головы электродов (в виде электроэнцефалограмм или ЭЭГ) и дистанционно отражали общую электрическую активность мозга, а также сигналы, которые фиксировались посредством введения в мозг тонких микроэлектродов и свидетельствовали об активности отдельных нейронов. Изучение электрической активности мозга было, как говорится, самой крупной игрой в городе. (Молекулярная генетика, которая сегодня стала главным двигателем биологической науки, тогда была представлена в основном биохимией, а геновая инженерия еще не появилась.)

Вряд ли стоит говорить, что электрические сигналы отдельных нейронов чрезвычайно слабы, а потому уязвимы для

помех со стороны всех видов проходящих мимо электромагнитных волн, излучаемых полицейскими рациями, телевизионными вышками, медицинскими пейджерами и т. д. Поэтому испытуемого, человека или животное, часто помещали в специальную проволочную «клетку», которая экранировала нежелательные электромагнитные волны.

Другим способом защититься от помех было поместить между их источником и местом записи непроницаемую преграду — например, землю. Вот почему многие лаборатории размещались в подвалах или же их стены обшивались специальными медными экранами. (С тех пор регистрирующая аппаратура значительно улучшилась, усовершенствованные усилители позволяют нам чисто записывать самые слабые сигналы, поэтому необходимость в таких крайних мерах защиты сегодня отпала.)

В те времена в типичной исследовательской лаборатории работали три-четыре исследовательские группы, каждая из которых занимала три-четыре комнаты. Группа включала независимого руководителя (профессора), а также трех-четырех постдоков (молодых ученых, недавно получивших докторскую степень) и лаборантов. Профессора обычно ютились в крошечных угловых кабинетах, постдоки — в отдельной комнате или закутке рядом с аппаратной. Виварий для мелких млекопитающих обычно располагался в конце длинного коридора. В первый день резкая вонь буквально валила новичка с ног. К счастью, запах постепенно ослабевал и через несколько недель пропадал вовсе. Мыши и кролики с их подстилками и экскрементами никуда не исчезали, но ваша обонятельная система через какое-то время просто переставала реагировать на этот раздражитель (о, благословенный дар сенсорного привыкания!).

В этих лабораториях почти не было стеклянных колб и бутылей, которые так любят показывать в фильмах. Вместо них всюду стояли стеллажи с усилителями, акустическими

колонками, записывающими устройствами, блоками питания и прочей электроникой. Если лаборатории посчастливилось иметь компьютер, тот был размером с холодильник, имел мощность меньше моего смартфона и понимал только машинный язык. Программировать его умел лишь специально обученный программист, который использовал для этого примитивный машинный код, недалеко ушедший от двоичных последовательностей нулей и единиц. Жужжащие вентиляторы, охлаждавшие легко перегревавшиеся внутренности электронного монстра, смешивали запах новой проводки и горячего металла с запахами животных, спирта и эфира.

Мы невероятно дорожили лабораторным оборудованием. Нашей главной рабочей лошадкой был катодно-лучевой осциллограф с тускло светящимся зеленым экраном, дедушкой современных компьютерных дисплеев. Снимки экрана мы делали на пленочный фотоаппарат. Осциллограф требовал тщательной калибровки, и, поскольку он, как старый радиоприемник, работал на электронных лампах, с утра первым делом мне нужно было не забыть его включить, чтобы он успел нагреться к тому времени, когда мы планировали начать работу. Когда я создал собственную лабораторию, первый осциллограф обошелся нам в 2500 баксов (в долларах 1970-х гг.). Сегодня хороший аппарат можно купить всего за 500 долларов.

СТИВЕН КУФФЛЕР

Основоположник нейробиологии Стивен Куффлер сделал очень много для того, чтобы эта наука стала такой, какой мы ее знаем сегодня. Огромную роль сыграли не только его новаторские научные работы и публикации, приверженность делу и высокая планка, которую он задавал для всех окружающих, но и умение выбирать людей — учеников и коллег, которые сегодня составляют значительную часть

элиты в американской нейрологии. Его боготворили все, кто его знал. Техники, обслуживающие оборудование, секретари, лучшие ученые умы — все обожали Стивена Куффлера⁵.

Худошавый и подвижный, он напоминал подростка. Всю жизнь он увлекался теннисом, но мало кто знал, что в юности он был чемпионом Австрии в этом виде спорта. Куффлер родился в 1913 г. в Венгрии и вырос в семейном имении. В автобиографии он назвал это место фермой, но другие описывали его как крупное поместье, где работало большинство жителей соседней деревни. Раннее детство было счастливым временем, но в 1919 г., когда в Венгрии разразилось коммунистическое восстание, его семье пришлось бежать в Австрию. Куффлер учился в католической школе-интернате, а затем поступил в медицинскую школу. К несчастью, его отец разорился и вскоре умер, оставив семью без средств. Юному Стивену, которому на тот момент не исполнилось еще и 20 лет, пришлось самому зарабатывать себе на жизнь. В 1937-м он окончил медицинскую школу и снова бежал из страны, едва успев до германского вторжения в Австрию.

Через Венгрию, а затем через итальянский Триест Куффлер перебрался в Лондон, где у него были друзья. Но, не имея лицензии на медицинскую практику в Англии, он был вынужден снова эмигрировать, на этот раз в Австралию, где познакомился с Джоном Экклсом и Бернардом Кацем, будущими титанами нейробиологии, и начал свою карьеру ученого-исследователя. В период интенсивной работы с 1939 по 1944 г. эти трое сделали фундаментальные открытия в области нейронной проводимости и работы синапсов.

Но административные препоны положили конец сотрудничеству. Куффлер со своей австралийской невестой уехал в Чикаго. Его научная репутация уже бежала впереди него. В конце концов он перебрался в Гарвард, где основал кафедру

нейробиологии — если это была и не первая академическая кафедра нейронаук в мире, то наверняка одна из первых. На тот момент такой научной дисциплины еще не существовало, а Американское общество нейронаук было создано лишь пару десятилетий спустя (мой членский номер 000064 выдает во мне настоящего старожилу). Кафедра Куффлера быстро стала ведущей в Северной Америке. Она славилась семейной атмосферой, а студентов туда тщательно отбирали. Через несколько лет после ее основания я провел там два года как приглашенный научный сотрудник.

Исследовательские стандарты на кафедре чрезвычайно высоки: там царил дух научной элитарности, если не сказать высокомерия, и они не стыдились этого. В некотором роде кафедра Куффлера была академическим эквивалентом «Волшебного автобуса» Кена Кизи*. Если вы соответствовали их критериям, вас принимали в семью. Если нет, так прямо и говорили.

Атмосфера в этом научном «автобусе» была потрясающей; ученые развлекались от души. Сам Куффлер любил пошутить и прославился своей простотой и жизнерадостностью во всем Гарварде. Сотрудники его кафедры были Веселыми шутниками нейронауки, представляя собой странную и уникальную смесь высочайшего интеллекта, жесткой дисциплинированности, требовательности и умения подшучивать. Семинары проходили весело; от докладчиков ожидали, что их выступления будут безукоризненными с научной точки зрения, но при этом доходчивыми и приправленными здоровой долей юмора.

На кафедре имелась своя обеденная комната, где ученые обычно отдыхали в перерывах между экспериментами. Так со временем родилась практика обеденных семинаров.

* Переоборудованный и ярко раскрашенный школьный автобус, на котором члены коммуны хиппи «Веселые прокачки» во главе с идеологом Кеном Кизи в 1960-х гг. путешествовали по США. — *Прим. пер.*

По мере того как известность кафедры росла, в Бостон приезжало все больше любопытствующих ученых, и их обычно приглашали провести семинары. В конце концов гостей оказалось так много, что запланировать отдельное мероприятие для каждого стало попросту невозможным. Решением стала система обеденных семинаров. Все, что требовалось сделать приглашаемому сотруднику, — написать имя докладчика на календаре на двери комнаты. Не было никакого формального отбора и утверждения докладчиков, никаких официальных программ; вся ответственность лежала на приглашающем. Тем не менее контроль качества существовал, и довольно жесткий: если ты приглашал плохого докладчика, ты терял лицо. Хуже того, твоего гостя могли публично разнести в пух и прах.

На этих обеденных семинарах на нас обрушивалась лавина захватывающих научных новостей. Два-три таких выступления в неделю позволяли нам полностью быть в курсе того, что происходило за стенами нашей лаборатории. О многих новых открытиях мы зачастую узнавали еще до их публикации, что на практике давало нам весомое конкурентное преимущество. Мы шли в авангарде нейронауки и невероятно гордились этим.

Физически доступ посторонним на кафедру не был запрещен (в университетах это не поощряется), но фактически ее мир был закрыт для чужаков. Никто не захлопывал перед ними дверь, но и никогда не приглашали на внутренние мероприятия, тем более на обеденные семинары. Если кому-то хватало глупости явиться по собственной инициативе, его ожидал ледяной прием. Естественно, «люди со стороны» — другие гарвардские ученые — возмущались своим положением аутсайдеров, особенно когда видели через стеклянную стену, как сотрудники кафедры нейробиологии смеются, что-то увлеченно обсуждают и занимаются своей удивительной наукой. Но для группы Куффлера это было волшебное

время. Так продолжалось до его смерти в 1980 г., после чего коллектив на удивление быстро распался. Сегодня кафедра нейробиологии Гарвардского университета по-прежнему остается замечательным местом и мировым лидером в области нейронаук, но ее бывшие сотрудники с ностальгией вспоминают славные былые времена.

(Если честно, все было не так однозначно. Необходимость показать себя с лучшей стороны слишком давила на сотрудников. Как признался мне один из ветеранов кафедры Куффлера, это был потрясающий опыт и ему понадобилось всего два года психотерапии, чтобы оправиться от него. Кроме того, нередкий в науке авторитарный стиль руководства иногда приводил к ошибкам.)

Как Стив Куффлер, этот обаятельный человек, брызжащий плохими каламбурами, сумел оказать такое влияние? После его смерти друзья и ученики опубликовали сборник воспоминаний. В нем Гюнтер Стент, отец-основатель молекулярной биологии, назвал Стива неподкупным. Другие превозносили научные таланты и принципиальность Куффлера, но характеристика «неподкупный» говорит о многом — о душевной чистоте.

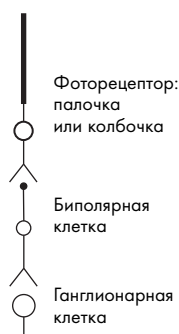
Куффлер отвергал любую помпезность, предпочитая ей приземленность. Как-то он засиделся допоздна за пинтой пива в соседнем пабе в компании пары постдоков, доцента и Торстена Визеля, будущего лауреата Нобелевской премии, сменившего его на посту заведующего кафедрой. Когда Визель принялся ворчать насчет бремени административной рутины, Стив посмотрел на него и с легкой улыбкой заметил: «Если хочешь прославиться, тебе придется пахать как проклятому».

Однажды за ланчем Стив услышал, как я сетую коллегам о том, что научная тема, над которой я работаю, была слишком узкой, а не общей (в те времена мне казалось, что она имеет отношение к сетчатке и только). Стив сидел на другом

конце стола и спокойно ел свой обед из пластикового контейнера. Посмотрев на меня, он улыбнулся и просто сказал: «Мы изучаем общее через изучение конкретного».

ЦЕНТРАЛЬНОЕ И ПЕРИФЕРИЧЕСКОЕ ЗРЕНИЕ

Чтобы понять, как сетчатка формирует визуальное сообщение для головного мозга, необходимо сначала узнать, как организованы ее нейроны. Сетчатка не просто набор светочувствительных клеток. Она содержит пять основных классов нейронов, каждый из которых выполняет свою функцию. Первый класс — фоторецепторы, называемые палочками и колбочками (мы говорим, что с них начинается зрительный анализатор).



Эти фоторецепторные нейроны чувствительны к свету (благодаря колбочкам мы видим в период от рассвета до заката, благодаря палочкам — при свете луны и звезд) и являются основными функциональными клетками сетчатки. Палочки и колбочки соединяются через синапсы с особым типом интернейронов — биполярными клетками, называемыми так потому, что, в отличие от других нейронов, у них имеются два четких полюса: один для получения, другой для передачи сигналов. Биполярные клетки получают входные сигналы от палочек и колбочек и передают их на ганглионарные клетки, чьи длинные аксоны, соединяясь в пучок, образуют зрительный нерв. Именно через ганглионарные клетки сетчатки мозг получает всю информацию о визуальном мире.

Чуть позже мы рассмотрим еще два типа нейронов сетчатки, которые делают процесс зрительного восприятия еще более захватывающим. Но пока вам необходимо понять,

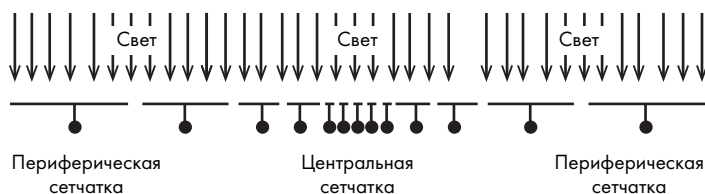
что фоторецепторы, биполярные и ганглионарные клетки составляют основу сетчатки и их организация определяет остроту нашего зрения.

Чтобы увидеть 25-центовую монету на расстоянии 150 м, требуется очень острое зрение. За него отвечает особая область сетчатки, называемая центральной ямкой, или фовеа. Большинство людей знают, что их периферическое зрение хуже центрального, но редко осознают, насколько велика эта разница. У обычного человека острое центральное зрение охватывает сектор всего около пяти градусов, что эквивалентно половине ширины моей ладони на расстоянии вытянутой руки. За его пределами острота зрения резко снижается. На самом деле, если я отведу свою вытянутую руку в сторону на 30–60 см, я с трудом смогу сосчитать на ней пальцы. У врачей-офтальмологов в обиходе имеется даже специальный термин для характеристики плохого зрения — «острота зрения, равная счету пальцев» (*finger-counting acuity*). Следующая ступень плохого зрения — когда пациент видит «только движения руки». Другими словами, в центральном поле мы видим хорошо, а за его пределами — почти слепы.

Почему же мы практически не осознаем, насколько слабо наше периферийное зрение? Когда наши глаза сканируют пространство, нам кажется, что мы видим объекты гораздо четче, чем они (как показывают измерения) видятся нам на самом деле. Это может быть связано с тем, что в нашей зрительной памяти зафиксированы все объекты, которые мы однажды детально рассмотрели центральным зрением.

Но наше периферийное зрение далеко не бесполезно. Оно выполняет как минимум две важные функции. Во-первых, оно очень чувствительно к *изменениям* на периферии поля обзора. То, что внезапно появляется, движется или мигает, мгновенно привлекает наше внимание к этому месту, побуждая исследовать его центральным зрением.

Во-вторых, периферийное зрение помогает нам ориентироваться в пространстве. Когда мы движемся, периферийным зрением мы отслеживаем крупные объекты: дверной проем, диван, холодильник, другого человека. Хотя эти изображения не детализированы, это позволяет нам прокладывать путь между препятствиями, избегая столкновения с ними. Данная функция периферийного зрения особенно наглядно проявляется у пациентов с возрастной макулярной дегенерацией (заболеванием сетчатки, которым страдает около 15% белых американцев в возрасте 80 лет и старше). Из-за частичного разрушения нейронов в центральной ямке у таких больных значительно ухудшается центральное зрение, вплоть до полной его потери, однако периферийное зрение почти сохраняется. В результате они не могут читать, узнавать лица или смотреть телевизор, но по-прежнему в состоянии передвигаться в пространстве — по своему дому и даже по городским улицам. Хотя с медицинской точки зрения они считаются слепыми, посторонний наблюдатель может не сразу это заметить.



Эта разница между центральным и периферийным зрением объясняется очень просто: в центральной области нашей сетчатки плотность пикселей гораздо выше, чем на периферии (см. рисунок). Пиксели, которые имеют значение в данном случае, — это ганглионарные клетки, последние звенья в нейронной цепи сетчатки, аксоны которых образуют зрительный нерв, идущий в головной мозг. На рисунке выше

отдельные ганглионарные клетки обозначены черными кружками, а Т-образные структуры над ними показывают рецептивные поля, с которых они собирают входные зрительные сигналы (другие клетки сетчатки на рисунке не показаны). В центральной части сетчатки самая высокая численность — и, следовательно, плотность расположения — ганглионарных клеток, вследствие чего каждая клетка имеет очень малое рецептивное поле. В направлении от центра к периферии ганглионарные клетки расположены все реже, а их рецептивные поля становятся все больше. Чем больше участок сбора входных зрительных сигналов, тем крупнее пиксели и тем ниже качество изображения.

Почему эволюция наделила значительную часть поверхности нашего глаза таким слабым зрением? Почему бы не покрыть всю сетчатку плотным слоем ганглионарных клеток, чтобы мы могли хорошо видеть не только ее центральной, но и периферической частью? Главное достоинство устройства нашей сетчатки опять же в экономичности. Ганглионарные клетки сетчатки — дорогое удовольствие. Они занимают место не только в сетчатке, но и в зрительном нерве: каждая такая клетка должна протянуть в мозг свой аксон. В норме зрительный нерв человека имеет диаметр около 4 мм. Но если бы плотность ганглионарных клеток по всей сетчатке была такой же, как в центре, то наш зрительный нерв был бы толщиной с садовый шланг. Не говоря уже о прочих моментах, мы бы попросту не могли двигать глазом в глазнице.

Кроме того, посылать в мозг такой плотный поток информации имело бы смысл только при условии, что мозг был бы в состоянии ее обработать и найти ей полезное применение. Как бы выглядел мир, если бы вы видели все поле обзора так же четко, как пространство вокруг точки фиксации? С одной стороны, было бы потрясающе видеть мир таким, каким он предстает на высококачественной фотографии

(большую часть которой вы можете охватить центральным зрением). Но что бы вы делали со всей этой информацией? Могли бы вы ее обработать всю сразу?

Похожая стратегия используется в некоторых управляемых бомбах и других военных устройствах с оптическим наведением. Их создатели не любят разглашать детали, но известно, что для локализации интересующего региона используется низкое разрешение, после чего разрешение увеличивается, чтобы максимально детализировать изображение и обнаружить искомую цель — используя минимально возможное количество вычислительного оборудования и ресурсов.

ПОЧЕМУ У ЯСТРЕБА ЯСТРЕБИНОЕ ЗРЕНИЕ?

Теперь давайте совершим путешествие в царство животных. Представьте себе пшеничное поле в конце лета после уборки урожая. Оно покрыто стерней и остатками соломы коричневато-песочного цвета. У самой земли копошатся полевые мыши, кормясь пшеничными зернами, выпавшими из колосьев во время жатвы. В небе на высоте около 60 м грациозно парит ястреб. Вдруг он складывает крылья и пикирует вниз. Когда он снова взмывает в небо, в когтях у него зажата мышь.

Как ястреб сумел с такой высоты разглядеть крохотную мышь в пять сантиметров длиной, прячущуюся среди стерни? У мыши неприметная коричневато-песочная шкурка под цвет соломы, а ястреб летит с довольно большой скоростью. Недаром люди называют очень острое зрение ястребиным. Многие пытались объяснить, в чем причина такой способности, выдвигая разные гипотезы. Например, что колбочковые клетки — светочувствительные рецепторы — у ястребов тоньше, чем у большинства других животных, поэтому они расположены в сетчатке более плотно. Или что у ястребов большое поле зрения — 290° по сравнению с 180° у людей.

У ястребов большие глаза: они занимают гораздо бóльшую часть его маленькой головы, чем глаза у человека или какого-либо другого млекопитающего. Большие глаза — это хорошо; как известно, чем больше объектив фотоаппарата, тем выше четкость фотографий. (Профессиональные фотографы, снимающие футбольный матч на краю поля, используют такие огромные объективы, что иногда с трудом удерживают фотоаппараты в руках, а некоторые камеры им приходится ставить на штатив.)

Все это интересные гипотезы, но в большинстве случаев в них присутствует элемент предвзятости. Авторы этих исследований *знают*, что ястребы хорошо видят, поэтому просто пытаются объяснить этот факт, вместо того чтобы объективно исследовать ястребиный глаз. Некоторые из объяснений не выдерживают проверки. Например, колбочковые клетки у ястребов действительно маленькие и размещены с большой плотностью, но их плотность всего примерно на 60% выше, чем у человека. Кроме того, глаз у ястреба действительно большой для такого маленького животного, составляя в диаметре около 12 мм, но в два раза меньше человеческого (24 мм). Конечно, у людей голова намного больше, но это никак не влияет на физику света: что касается оптики, то здесь люди далеко впереди.

Наконец, сравним разрешающую способность человеческого и ястребиного глаза⁶. При должном терпении можно научить ястреба выбирать между объектом-мишенью с лакомством (например, раскрасив мишень узкими полосами) и пустой мишенью (с широкими полосами), после чего протестировать, насколько тонкие полосы он способен различать. У пустельги, лучше всего изученного вида ястребов*, разрешение зрения на самом деле несколько хуже, чем у людей.

* В действительности пустельга — птица семейства соколиных. — *Прим. пер.*

Но постойте! Как же тогда ястреб ловит неприметных пятисантиметровых мышей среди стерни на сжатом поле? Нет никаких сомнений в том, что он видит гораздо лучше, чем мы. Как разрешить это кажущееся противоречие?

Я не ставлю под сомнение наблюдения орнитологов. Но на мой взгляд, главная причина превосходного зрения ястреба в том, что он хорошо видит всей сетчаткой, а не только ее центральной частью. Доказательством тому может служить количество и распределение нейронов сетчатки. Колбочковые клетки у ястреба не могут быть расположены намного плотнее, чем у нас: есть предел тому, сколько рецепторов можно втиснуть в ограниченное пространство. Но что действительно определяет остроту зрения, так это плотность ганглионарных клеток, а не колбочек.

Ключевой принцип состоит в том, что *разрешение любой системы передачи информации ограничено плотностью размещения наименее густо расположенных элементов в системе*. В сетчатке глаза — человека или ястреба — такими элементами являются ганглионарные клетки, которые составляют всего несколько процентов от общего количества нейронов в любом глазу. Известно, что у большинства животных их плотность резко снижается на периферии сетчатки. У ястребов такой перепад гораздо слабее выражен. На самом деле количество ганглионарных клеток в сетчатке ястребов в несколько раз превышает таковое у людей — около восьми миллионов по сравнению примерно с одним миллионом у среднестатистического человека. И эти ганглионарные клетки занимают у ястреба меньшую площадь. Да, у ястребов толстый зрительный нерв, но это им не мешает, потому что они больше используют движения головы, чем движения глаз.

Каким образом задействуются все эти ганглионарные клетки? Прежде всего в ястребином глазу, как у многих других птиц, имеется две области острого зрения — центральные ямки, одна из которых находится в центре, а другая —

чуть сбоку (у нас всего одна). Но главное — это общее распределение ганглионарных клеток по сетчатке. У человека их плотность на дальней периферии составляет всего 1% от их плотности в центре. У ястребов эта разница гораздо меньше — например, у пустельг периферическая плотность ганглионарных клеток составляет 75% от центральной, то есть на периферии сетчатки у них насчитывается около 15000 ганглионарных клеток на квадратный миллиметр, тогда как у людей — всего 500. Если мы практически слепы на периферии, то ястребы — нет. Мыши трудно скрыться от их острого зрения, способного сканировать полосу поля шириной в несколько метров.

Как я заметил несколько абзацев назад, неизвестно, как бы человеческому мозгу удавалось обрабатывать колоссальный поток зрительной информации, будь наше зрение одинаково острым по всей сетчатке. Похоже, ястребы находятся именно в такой ситуации — так как же они с этим справляются? Мы можем только догадываться, но ответ, скорее всего, кроется в том, что в их мозгу имеется мощнейший компьютер для обработки визуальных данных. Значительную часть ястребиного мозга занимает так называемое верхнее двухолмие — мозговая структура, которая также есть у людей. Пока мы не знаем, как именно работает эта нейронная система, но исходя из ее размера можем предположить, что она существенно превосходит в своей производительности подкорковые зрительные структуры человеческого мозга. Когда-нибудь, когда секреты обработки визуальной информации в зрительной системе птиц будут раскрыты, эти принципы могут быть применены и к искусственным системам обработки изображений. Создатели Adobe Photoshop, вам есть чему поучиться у пернатых!