The background of the entire page is a dense, repeating pattern of teal and black ovals. The ovals are scattered across the white background, creating a textured, organic feel. The teal ovals are more numerous than the black ones.

Роб Десалл

В С Т В а

s e n s e s

18+

В устах прекрасного рассказчика и знатока своего дела серьезная и сложная наука о чувствах становится понятной и доступной даже неспециалистам.

Йэн Таттерсалль, палеоантрополог

Захватывающий рассказ о кросс-модальных сенсорных реакциях и конкурирующих между собой «несовершенствах», составляющих человеческий мозг.

Publishers Weekly

Необычный и невероятно интересный взгляд на то, как мозг отвечает за чувства.

Library Journal

Оригинальное введение в нейробиологию сенсорного восприятия, включающее увлекательные истории о художниках, музыкантах и других «потребителях» и «источниках» энергии разума.

Kirkus Reviews

Rob DeSalle

our senses

An Immersive
Experience

Роб Десалл

Ч У В С Т В А

Нейробиология
сенсорного восприятия



Колibri
МОСКВА

УДК 159.93
ББК 88.251.1
Д37

Rob DeSalle
OUR SENSES
An Immersive Experience

Впервые опубликовано издательством Yale University Press

Перевод с английского Татьяны Землеруб

Научный редактор: П.А. Зыкин, кандидат биологических наук, доцент (Санкт-Петербургский государственный университет, биологический факультет, кафедра цитологии и гистологии, лаборатория функциональной нейроморфологии)

Десалл Р.

Д37 Чувства : Нейробиология сенсорного восприятия / Роб Десалл ; [пер. с англ. Т.Б. Землеруб]. – М. : КоЛибри, Азбука-Аттикус, 2021. – 368 с. ; ил.

ISBN 978-5-389-16547-2

Книга Роба Десалла обобщает новейшие результаты в сфере нейробиологических исследований человеческих чувств. В ней рассказывается не только о том, как мы видим, слышим, осязаем, чувствуем вкус и запах, поддерживаем равновесие, ощущаем боль, но и о том, как все это формирует наше восприятие мира, в том числе с эстетической и художественной точек зрения, помогая создавать произведения искусства. Затронув эволюционный аспект формирования восприятия и сознания, автор переходит к освещению таких тем, как пределы диапазона чувств у человека (сверхчувствительность и пониженная чувствительность), синестезия, полушарная специализация, болезни и аномалии, вызванные травмами, галлюцинации, и многих других. Проводя параллели с представителями других биологических видов и прибегая к сугубо научным инструментам (генетическим и биомолекулярным), Роб Десалл делает предельно понятными уникальные чудеса человеческого мозга.

«За последние десятилетия в нейрофизиологии появились новые способы, благодаря которым можно взглянуть на наши чувства и разобраться в них. Эта книга — подробное исследование уже известных фактов о наших чувствах и новых изысканий в этой области». (Роб Десалл)

УДК 159.93
ББК 88.251.1

ISBN 978-5-389-16547-2

© Rob DeSalle, 2018
© Patricia J. Wynne, illustrations
© Yale University, 2018
© Землеруб Т.Б., перевод на русский язык, 2021
© Издание на русском языке, оформление.
ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус», 2021
КоЛибри®

СОДЕРЖАНИЕ

Вступление.....	7
1. Безмозглое большинство <i>Как чувствуют те, у кого нет мозга</i>	14
2. Мозг и первомозг <i>Мозг (или его отсутствие) — от губки до человека</i>	31
3. Обезьяноункул <i>Осязательные способности и чувство равновесия у животных</i>	46
4. Дело вкуса (и запаха) <i>Восприятие вкуса и запаха у животных</i>	63
5. Во все глаза (и уши) <i>Как животные слышат и видят</i>	83
6. Супернюхачи и супердегустаторы <i>Ограничения восприятия запаха и вкуса у человека</i>	94
7. Где я? <i>Пределы слуха и равновесия человека</i>	118
8. Телячьи нежности <i>Осязание и как оно связано с другими чувствами</i>	135
9. Глаза <i>Пределы человеческого зрения</i>	146
10. Всякое может случиться <i>Травмы мозга и их влияние на чувства</i>	164
11. Современная жизнь: апоплексические удары и чувства <i>Влияние инсультов и других нарушений головного мозга на сенсорную способность</i>	186

12. Мозг: целый/половинчатый/расщепленный	
<i>Люди с уникальным мозгом</i>	199
13. «Команда соперников» против «его несовершенства»	
<i>Разбираемся в кроссmodalных стимулах внешнего мира</i>	213
14. Нейронный мусор	
<i>Разбираемся с шумом окружающей среды</i>	227
15. Пани ка меуза, крем-брюле и синестезия	
<i>Как кроссmodalность действует на вкус и синестезию</i>	243
16. Коннектомы	
<i>Как работает мозг при кроссmodalных взаимодействиях</i>	268
17. Лица и галлюцинации	
<i>Узнавание лиц и галлюцинации как высшая форма восприятия</i>	283
18. Нобелевская премия Боба Дилана	
<i>Язык, грамотность и взаимоотношения чувств при создании литературных произведений</i>	300
19. Лицом к лицу с музыкой	
<i>Нейробиология музыки и живописи</i>	314
20. Нет пределов	
<i>Пределы работы органов чувств и будущее чувств</i>	333
Благодарности	344
Библиография и дополнительная литература	345

ВСТУПЛЕНИЕ

Человек — единственное существо на планете, умеющее думать, читать, петь, танцевать и говорить, то есть хорошо делать почти все, что связано с мышлением. Один из самых интересных подходов к пониманию этого уникального аспекта нашего существования заключается в изучении работы органов чувств, создающих восприятие человеком окружающей среды. Путь от изучения частиц света, звуковых волн, вкусовых и запаховых молекул и других явлений внешнего мира к исследованию того, что наш мозг воспринимает, создает захватывающую историю жизни людей в мире природы. За последние десятилетия в нейрофизиологии появились новые способы, благодаря которым можно взглянуть на наши чувства и разобраться в них. В результате различных нейробиологических открытий — от инновационных технологий визуализации до важных исследований генома и экспериментов недоступного ранее уровня сложности в когнитивной психологии — сформировалось более четкое понимание не только того, что значит видеть, слышать, обонять, осязать, сохранять равновесие и ощущать вкус, но и того, как эти чувства формируют наше эстетическое, художественное и музыкальное восприятие мира. Эта книга — подробное исследование уже известных фактов о наших чувствах и новых изысканий в этой области.

Трудно определить, что относится к чувствам, а что — нет. Например, равновесие считается таковым, но Аристотель не включал его в свою «большую пятерку» (слух, обоняние, зрение, вкус и осязание). Только недавно его отнесли к чувствам — отчасти из-за близости балансовых структур внутреннего уха к слуховой системе, но главным образом потому, что чувство равновесия сообщает нашим телам об их положении во внешнем мире. Некоторые утверждают, что существует ни много ни мало, а тридцать три отдельных чувства. И, как мы увидим в этой книге, наше восприятие мира редко опирается на одно-единственное чувство. Нейробиолог Лоуренс Харрис даже заявил: «Ни один орган чувств не функционирует независимо от других, а перечисление всех тридцати трех чувств может оказаться контрпродуктивным».

Очевидно, что вслед за равновесием к «большой пятерке» надо добавить и боль, или ноцицепцию. Восприятие боли — это интересная тема, которая по этическим соображениям обычно сводится к тому, чувствуют ли животные боль или нет. Некоторые считают, что даже растения испытывают боль, но мы должны различать реакцию или ее отсутствие на какой-то внешний раздражитель в нейронном контексте от реакции, не имеющей отношения к нервной системе. Реакция растений, в отличие от человека, не связана с нервной системой. Даже когда организм выдает нервную реакцию, нам нужно отличать реальную болевую реакцию от того, как мы воспринимаем боль. Мы называем эту реакцию болевой, потому что физически испытываем неприятное ощущение от ноцицептивных рецепторов, откликающихся на жару, холод или давление. Однако некоторые организмы с системами ноцицепции, возможно, не ассоциируют раздражитель с мучением. Например, мухи не останутся надолго в экстремально жарком месте и будут довольно любопытно реагировать на повышение температуры, но неизвестно, испытывают ли они при этом физическую боль. Считается, что даже рыбы не связывают ноцицепцию с болевым раздражителем, то есть не испытывают того, что мы называем болью. Некоторые исследователи утверждают, что рыбы не чувствуют боли, потому что их нервная система раз-

вита довольно слабо для ее восприятия (у них есть только минимально развитая кора головного мозга). При этом другие твердо убеждены, что реакция рыб на физическое раздражение есть не что иное, как боль. Мораль этой ноцицептивной истории такова: обсуждая чувства и перцепцию, мы должны знать, что мозг разных организмов воспринимает и транслирует сигналы окружающего мира неодинаково.

Восприятие тепла и холода тоже не относится к «большой пятерке» чувств. Мухи ощущают и тепло, и холод, как и многие другие многоклеточные эукариоты¹ и даже микробы, потому что и они, и люди имеют схожий молекулярный механизм восприятия температуры. У большинства организмов есть надежный защитный механизм от перегрева, называемый реакцией на тепловой удар: при экстремальных значениях активизируются определенные гены, которые производят белки, помогающие клеткам справиться с повышенной температурой. Существуют и другие гены — белки-антифризы. Они помогают клеткам справиться с холодом, а организму — выжить в условиях низких температур. Да, в этом случае молекулы клеток «воспринимают» тепло и холод, но можно ли сказать, что они делают это точно так же, как и весь организм в целом? «Чувствует» ли организм тепло и холод, зависит от того, есть ли у него мозг и как тот обрабатывает информацию.

Например, определенные гены в геноме мухи могут видоизменяться так, что она перестает ощущать тепло или холод. Эксперимент, в ходе которого выявляются мухи-мутанты, жесток: их помещают на электроплиту и наблюдают за ними. Обычные мухи спасаются бегством, когда температура поверхности становится выше температуры тела на 10–20 градусов. А вот мутанты продолжают сидеть на плите, даже когда их лапки начинают прижариваться. Существуют и аналогичные мутанты с устойчивостью

¹ Эукариоты, или ядерные, — надцарство организмов, клетки которых содержат ядро; к ним относятся грибы, животные и растения. — *Здесь и далее, если не указано иное, прим. перев.*

к холоду. Мы можем сделать вывод: мухи ощущают тепло и холод, потому что генерируется реакция (они улетают). Бактерии, скорее всего, не воспринимают тепло и холод, а вот их белки — очень даже. Таким образом, важно провести границу между восприятием и простым физиологическим откликом.

Есть и другие чувства, не входящие в «большую пятерку»: восприятие времени суток, магнитных и электрических полей, голода и изменений кровяного давления. Но снова нужно определить, действительно ли мы воспринимаем их на нейронном уровне или наши клетки просто физиологически реагируют на некоторые внешние изменения?

Рассмотрим, например, артериальное давление. Когда оно повышается, мы можем это почувствовать, а можем и не заметить. Однако сильное повышение давления провоцирует определенные реакции организма, которые наш мозг не распознает по внешним признакам. Более чем вероятно, что это реакция физиологическая, заранее запрограммированная и неконтролируемая. Другими словами, наше тело распознает изменение артериального давления и реагирует на него, но мы не всегда способны оценить этот отклик и часто не воспринимаем его так же, как воспринимаем свет, падающий на сетчатку глаза.

Итак, я буду рассматривать все вышеперечисленные ответные реакции как «неаристотелевские» чувства. Некоторые из них я исследую как часть эволюционных систем, возникших в ответ на изменения окружающей среды, но, говоря о восприятии, я буду придерживаться «большой пятерки» наряду с равновесием, болью и температурой.

Я не стал ориентироваться на традиционный подход и разбирать каждое из пяти чувств в отдельной главе. Вместо этого я описал шесть важных явлений, которые, по мнению исследователей, объясняют работу органов чувств. Во-первых, наши чувства появились в процессе эволюции, и можно очень многое узнать, если рассмотреть нейронную систему именно в этом контексте. Во-вторых, человеческие чувства ограничены, хотя мы воспринимаем довольно широкий спектр проявлений внешне-

го мира. Однако другие организмы иногда имеют сверхчувства, и на их примере прекрасно видно, как они работают и каковы пределы диапазона чувств у человека. В-третьих, представители нашего вида очень разнообразны — есть люди со сверхчувствами и с пониженной чувствительностью. Благодаря и тем и другим мы можем не только описать сами чувства, но и понять, как именно люди используют чувства для интерпретации окружающего мира. В-четвертых, травма может изменить чувства человека. Исследователи многое узнали о подобных аномалиях и особенно о том, как те связаны с функционированием мозга. Наши чувства вовлечены в начальные этапы интерпретации явлений и ситуаций, с которыми мы сталкиваемся. В-пятых, наши чувства взаимодействуют друг с другом, создавая согласованное восприятие внешнего мира. Экстремальным проявлением подобной кроссmodalности (переноса ощущений) является синестезия — феномен смешения чувств. Например, некоторые синестеты знают вкус каждого цвета и формы. Кроссmodalность отлично иллюстрирует, как работают наши чувства и восприятие. То, как мы воспринимаем музыку, искусство, еду и другие внешние стимулы, может помочь нам понять принципы работы органов чувств. Этот — шестой — подход к изучению работы органов чувств разъясняет, как наши чувства взаимодействуют между собой и как наш мозг выполняет функции высшего порядка, такие как чтение, музицирование или творчество. И именно то, как мы определяем или позиционируем себя в контексте внешнего мира, используя эти функции, — важный шаг к пониманию работы сознания.

Галлюцинации (аномальный аспект сознания) состоят из интенсивных, измененных и основанных на чувствах переживаний. Это измененное восприятие реальности дает нам новое понимание того, как работают наши чувства. Слуховые галлюцинации особенно увлекательны и часто используются при постановке диагноза психических заболеваний. Многого можно узнать, изучая их происхождение и проявления. Иногда галлюцинации создают проблемы при адаптации человека к жизни, но для многих худож-

ников и музыкантов слуховые галлюцинации были источником творчества. Очевидно, что в этот феномен вовлечены аспекты структурных изменений головного мозга. В дополнение к галлюцинациям своеобразным шлюзом к пониманию работы сознания можно считать важную в культурном отношении деятельность: музыку, искусство и чтение. Нет двоих людей, которые бы одинаково реагировали на какое-либо произведение изобразительного искусства, на вкус и текстуру пищи или определенную музыку. Роль чувств в подобной вариативности непреложна. Кроме того, новые исследования показывают, что кроссмодальность улучшает музыкальные способности, а быть может, и музыкальный вкус.

Существует и другая причина, по которой величайшие творения искусства, литературные и музыкальные произведения по-разному воздействуют на человека, и касается она контекста, в который мозг наблюдателя или слушателя помещает эти работы. У каждого человека есть свой набор воспоминаний и импульсов, полученный в результате жизненного опыта, который перерабатывается мозгом в определенный контекст. Можно многое понять о человеке, если разобраться, как в этом танце чувств сливаются воедино мозг и опыт. В 2016 году, например, опубликовано исследование, в котором ясно показано, какую важную роль играют эмоции, когда джазовый музыкант сочиняет музыку.

Какие же существуют ограничения? Я прихожу к выводу, что в будущем не будет пределов тому, что мы сможем почувствовать. Люди постоянно изобретают методы для расширения несколько узких диапазонов развитых чувств зрения, слуха, вкуса, обоняния и осязания. Фокусирование на чувствах дает нам возможность углубиться в наше восприятие себя как вида и показывает, как мы, сознательные существа, воспринимаем внешний мир природы. Наши чувства — окошко в наше восприятие реальности и в понимание, что сознание значит для нас. Все наши чувства начинаются с какого-то внешнего воздействия. Сигнал, производимый раздражителем, передается в мозг нервными импульсами, и в специфических областях мозга стимул интерпретируется таким образом, что мы воспринимаем что-то из внешнего мира.

Затем включаются воспоминания, и мы трактуем ощущения в контексте нашего существования, нашего прошлого, потребностей и желаний.

И напоследок хочу упомянуть о будущем наших чувств и о том, как может измениться сознание. В течение последних двух десятилетий наши зрительные, слуховые и тактильные чувства подвергались воздействию компьютерных технологий, которые оказывают огромное влияние на повседневные нейронные процессы. Разработки интерфейса «мозг-компьютер» привели к технологическому прорыву — появилась возможность восстановить слух и зрение тем людям, которые их потеряли или никогда не имели. Все эти современные достижения повлияли на то, как чувство реальности и сознания формулируется в нашем мозге. Я надеюсь, что вы получите удовольствие при чтении этой книги благодаря всем вашим чувствам!

БЕЗМОЗГЛОЕ БОЛЬШИНСТВО

Как чувствуют те, у кого нет мозга

У растений нет мозга, потому что они
никуда не идут.

РОБЕРТ СИЛЬВЕСТЕР,
профессор образования и философ

Человеческий мозг и чувства — это результаты эксперимента, который идет на нашей планете миллиарды лет. Чтобы выяснить, какие события имеют значение в этом эксперименте, и понять наши уникальные способности воспринимать окружающий мир, необходим эволюционный подход. И он требует, чтобы мы сосредоточились на нескольких важных результатах эволюции: биоразнообразии и исключениях. За 3,5 миллиарда лет эволюции на Земле возникло удивительное многообразие организмов, без которого мы не смогли бы исследовать многие нюансы наших собственных сенсорных способностей. Например, наша способность слышать звуки в определенном диапазоне всесторонне описана, но мы бы не знали, что наш слуховой диапазон биологически ограничен, если бы не изучили эхолокацию летучих мышей. Таким образом, исследование биоразнообразия позволяет нам шире взглянуть на собственные биологические характеристики, связанные с восприятием. Исключения же привлекают наше внимание к мельчайшим подробностям того, как обычно все работает в природе, а также позволяют нам задаться вопросом: почему они возникают? Примеры исключительного восприятия нам предоставляют и сама природа, и наблюдения за сенсорными преде-

лами человека. Многие исключения — это результат эволюции какого-то вида. Некоторые из сенсорных исключений помогают понять, как работает конкретное чувство и как могла развиться сенсорная реакция.

Одним из примеров полезности сенсорных исключений является распределение обонятельных генов у животных. Число функциональных обонятельных генов, обнаруженных у позвоночных на сегодняшний день, варьируется: у североамериканского красноногого анолиса, небольшой ящерицы, их менее двадцати, а у слона — более двух тысяч. Для сравнения: у человека примерно четыреста подобных генов. Если мы сопоставим число генов с тем, как чувствуют запах разные животные, мы можем многое узнать о нашем обонянии. Разнообразие организмов на нашей планете демонстрирует удивительные природные эксперименты и открывает колоссальные возможности в плане понимания чувств.

Все виды связаны между собой через общих предков, и это позволяет нам взглянуть на этапы эволюции наших уникальных сенсорных способностей. Древо жизни — прекрасный способ продемонстрировать как важность биоразнообразия, так и полезность общего происхождения. По этой причине на протяжении всей книги я буду использовать древо жизни как организующий принцип для наших органов чувств и мозга.

Человеческий мозг — это сложная структура, где обрабатываются чувства и происходит восприятие. В процессе эволюции мозг высших животных развивался, чтобы накапливать информацию из внешнего мира, обрабатывать данные и обеспечивать выживание. Большинство видов из почти двух миллионов, известных науке на сегодняшний день, имеют мозг (ученые проводят различие между числом неизученных и изученных существующих видов, потому что рассматривают вид, который не был определен и описан, как нечто бессмысленное в упорядоченном мире). Все это может привести к мысли, что мы живем в очень «мозговитом» мире, настроенном на знакомые нам чувства. Однако у подавляющего большинства обитателей этой планеты мозга нет,

и его отсутствие также весьма оправданно в вопросе выживания. Организмы без мозга все же могут довольно хорошо чувствовать и интерпретировать среду, в которой они живут. И выходит, что эти безмозглые организмы и есть то самое позабытое большинство, населяющее Землю.

Большая часть организмов — это неизвестные науке одноклеточные. Недавние исследования человеческого микробиома показали, что в среднем более десяти тысяч видов бактерий живет внутри и снаружи нашего тела, и многие из них безымянны и не включены в таксономическую систему. И это только тело человека! Если проанализировать океан или почву, легко убедиться: количество видов бактерий там зашкаливает. В 1980-х годах известный энтомолог Терри Эрвин предположил ошеломляющую возможность: на Земле может проживать в десять, а то и в сто раз больше видов организмов, чем известные на тот момент 1,5 миллиона. Впоследствии ученые начали открывать все новые и новые виды бактерий. В 2009 году микробиолог Роб Данн предположил, что существует по крайней мере сто миллионов видов микробов (журналисты назвали эту теорию «провокацией Данна»), а следовательно, на Земле проживает минимум двести миллионов видов организмов. Большая часть этих видов — микроорганизмы, а значит, мозг у них отсутствует. Вдобавок к этому стоит принять во внимание, что 99,9% всех организмов, когда-либо живших на планете, вымерло. Если учесть, что бактерии и одноклеточные организмы существовали еще за 2 миллиона лет до появления животных и растений, то примерное количество одноклеточных воистину поражает. Имеющие мозг организмы всегда были в крайнем меньшинстве, поэтому Земля — довольно «безмозглая» планета.

Так откуда же вся эта суeta вокруг мозга? Для восприятия мозг не нужен. Галилео Галилей однажды написал: «Прежде чем зародилась жизнь, особенно высшие ее формы, все было невидимым и безмолвным, хотя солнце светило и рушились горы». Высказывание Галилея в ретроспективе означает, что до появления механизма восприятия света у бактерий такое понятие, как свет, от-

существовало в принципе, а следовательно, не было и самого света. Первые организмы, развившие в себе подобные клеточные механизмы, метафорически прокричали: «Да будет свет!» Вероятнее всего, те первые чувствительные организмы сфокусировались на каком-то одном внешнем природном раздражителе: на свете, на особом виде молекулы, плавающей вокруг, на гравитации или магнетизме.

Андрей Анишкин и его коллеги предполагают, что первобытное чувство возникло как возможный ответ липидной мембраны, окружающей клетку, на механическое воздействие. Другими словами, любая физическая сила, сместившая первичную мембрану, стала первым внешним раздражителем, который клетки научились чувствовать. Эксперименты показывают, что сила, воздействующая на внешнюю липидную мембрану клетки, может привести к конформационным изменениям молекул¹, встроенных в мембрану. Подобные изменения в конформации молекул действуют как переключатели встроенных клеток. Если молекулы сжаты или деформированы, они изменяют форму, что может включить или отключить другие реакции внутри клетки. Одной из наиболее распространенных сил внешней среды, воздействующих на клетку, выступает осмотическое давление, вызванное различными концентрациями соли внутри и снаружи клетки. Анишкин и его коллеги предполагают, что такая сила, как осмотическое давление, могла быть первым чувственным переживанием, с которым столкнулась замкнутая клеточная форма жизни. Это явление фактически все еще существует в современных клетках, что указывает на умеренный темп эволюции за 3,5 миллиарда лет с момента зарождения жизни на Земле. Когда структура или процесс в ходе эволюции оказываются адаптивными, они сохраняются у потомков в резуль-

¹ Конформация молекулы — пространственное расположение атомов в молекуле определенной конфигурации, обусловленное поворотом вокруг одной или нескольких одинарных сигма-связей. Конформационные изменения молекул белков рецепторов синаптических мембран и внесинаптических рецепторов давно рассматриваются как физическая основа памяти в ЦНС.

тате естественного отбора. Но другая интересная возможность заключается в том, что неродственные организмы опять и опять заново открывают аналогичные процессы или структуры в эволюционной истории. Такой вид эволюции называется аналогией или конвергенцией, и примеров ему предостаточно. Скажем, крылья, независимо возникшие у птиц, млекопитающих, насекомых и птерозавров, отлично иллюстрируют конвергенцию.

Так почему же именно мозг? Первичные одноклеточные организмы обладали чрезвычайно ограниченными способностями чувствовать, они сводились к восприятию единичных воздействий окружающей среды. Мозг развивался, чтобы обеспечить более точную интеграцию чувственных сигналов и тонкое восприятие информации из внешнего мира. Мозг делает наше окружение более понятным, обнаруживая и обрабатывая широкий спектр стимулов, постоянно бомбардирующих нас извне.

Мозг должен обработать мощный хаотичный информационный поток, накатывающий из окружающей среды, дротиками пронзающий организм и сталкивающийся с его органами чувств. Одну из форм этого хаоса легче всего представить в виде набегающих волн. Для лучшего понимания того, как наша нервная система воспринимает свет, можно сказать, что электромагнитное излучение (им по сути является свет) одновременно ведет себя и как волна, и как частица. Это значит, что свет обладает и теми и другими качествами. Одна из характеристик волны — ее длина. В следующий раз, когда будете на пляже, посмотрите, как на берег набегают волны. Длина волны — это расстояние от гребня одной волны до гребня следующей. Электромагнитное излучение с различными длинами волн (рис. 1.1) имеет разные характеристики и может варьироваться от 0,000000000001 метра (гамма-лучи) до более чем 10 000 метров (радиоволны). Люди различают свет только в очень узком диапазоне этого спектра — от 400 до 700 нанометров, или от 0,0000004 до 0,0000007 метра. Невидимый (для человеческого глаза) диапазон света за пределами конца спектра с короткими волнами (400 нм) называется ультрафиолетом, или ультрафиолетовым светом. Сразу за концом спектра с длинны-

1.1 | КАК И ПОЧЕМУ МЫ РАЗЛИЧАЕМ ЦВЕТА?

Когда свет падает на объект, он обрушивается на огромное количество молекул, из которых состоит этот объект. Поскольку свет и электромагнитное излучение также считаются частицами, ученые дали имя фундаментальной частице электромагнитного излучения — фотон. Когда фотон взаимодействует с чем-то, для него есть два варианта: он может быть поглощен или отражен. Поэтому, когда свет, состоящий из фотонов с разной длиной волн, сталкивается с объектом, происходит взаимодействие, которое можно разложить на миллионы и миллионы всякого рода аспектов. Некоторые молекулы будут отражать фотоны, другие — поглощать их. Отраженные фотоны попадают нам в глаза, и мы видим цвет предмета. Например, ткани растений содержат молекулы хлорофилла. Благодаря своей форме (напоминающей верхнюю часть молота Тора) и своему размеру они поглощают свет с длиной волн 430 и 662 нанометра. Эти две волны дают синий и красный цвет соответственно. Хлорофилл не поглощает свет с длиной волн в диапазоне от 430 до 662 нанометра, где находится зеленый цвет и видимая для нас часть цветового спектра. Если на объект, способный поглотить волны разной длины, направить широкий спектр света, то он поглотит их все. То есть не будет фотонов видимого спектра, которые отразятся от объекта, и он останется бесцветным. Цвета, которые мы можем различить, — это лишь результат отражения частиц света с разной длиной волн от предметов в направлении наших глаз.

ми волнами (700 нм) находится инфракрасное (тепловое) излучение, или инфракрасный свет. Между ними находятся цвета, которые можно различить глазом: фиолетовый, синий, зеленый, желтый, оранжевый и красный — в этом списке они расположены от меньшей длины волны к большей. Как и почему наше восприятие цвета застряло в этом узком диапазоне — это история об эволюции и адаптации. Чтобы понять это, нам нужно понять физику света и длины волны.



Рис. 1.1. Электромагнитный спектр (диапазон длин волн фотонов, воздействующих на нас в природе). Диапазон световых волн — более восемнадцати порядков. Видимая часть спектра представлена всего лишь небольшой полоской между 400 и 700 нанометрами

Мы не видим весь спектр света — скажем, в ультрафиолетовом и инфракрасном излучении, — потому что наши глаза в результате эволюции стали различать только узкий диапазон волн. Хотя для большинства организмов основной источник электромагнитного излучения — это Солнце, многие другие источники генерируют фотоны, которые и составляют световые волны. Рентгеновские лучи — пример света, созданного эмиссией (испусканием) электронов из атомов. Наши глаза не видят рентгеновские лучи, однако мы придумали отличный способ использовать фотографирование для их выявления.

Люди постоянно пытаются найти способ выйти за пределы своих естественных границ и расширить диапазон не только зрения, но и других чувств. Это важный и непрерывный процесс. Другие источники длины волны включают биолюминесценцию — форму света, которая в видимом спектре излучается живыми организмами, производящими, а не отражающими свет.

Другая составляющая хаоса — это молекулы в воздухе, а также в твердых телах, газах и жидкостях, с которыми мы контактируем. Эти молекулы состоят из атомов, которые самыми различными путями формируют сложные соединения и создают невероятное

количество маленьких объектов, плавающих в воздухе или в том, что мы глотаем. Некоторые из этих молекул совсем крошечные, но все они имеют отличительные формы и размеры и могут быть достоверно распознаны посредством механизма «ключ-к-замку», который реализуется белками клеточной мембраны. Части этих белков работают как замки, расположенные с внешней стороны клетки. Когда появляется небольшая молекула, которая подходит к замку как ключ, она образует комплекс с белками клеточной мембраны и меняет их форму. Это инициирует ряд реакций внутри клетки, и вызванная цепная реакция меняет ее состояние. То, что происходит в клетке, называется трансдукцией или передачей сигнала, и этот процесс лежит в основе работы нервной системы и реакции одноклеточных организмов на внешние раздражители. В этих маленьких молекулах, которыми наполнена наша среда обитания, заложена суть того, как мы и другие организмы воспринимаем вкусы и запахи.

Иногда перемещение воздуха вокруг нас (или воды, если мы плаваем) вызывает шквал ощущений. Вспомните, как заметно чувствуется движение воздуха, когда вы подносите руки к сушилке в общественном туалете. И невозможно забыть (кто угодно может это подтвердить) то чувство, когда мы ударяемся головой обо что-то твердое, например о притолоку подвала. А это значит, что, когда наша кожа вступает в контакт с газообразным, жидким или твердым объектом, у нас возникает механическая реакция. Организмы должны знать, где именно они находятся в пространстве, поэтому многие формы жизни разработали способы отслеживания своего положения, и все они связаны с чувством равновесия. Хаос воздействия внешней среды, который вызывает потребность в равновесии, возникает под действием силы тяжести и из-за движения организма. К другим переменным факторам относятся температура, магнитное и электростатическое поля.

Специализированные клетки организма обнаруживают сенсорную информацию в окружающей среде. Но как они это делают? Механизм одноклеточных организмов сильно отличается от механизма таких многоклеточных, как растения и высшие

1.2 | КАК УСТРОЕН ЗВУК?

Звук — это раздражитель, воздействующий на наши органы чувств посредством волн определенной длины, передающихся в воде, воздухе, гелиевой и других средах, и воспринимаемый как вибрация. Звуковые волны имеют тенденцию вытеснять воздух и частицы, летающие в нем. Разные источники звука испускают волны различной длины, что обеспечивает существование в природе широкого звукового диапазона. Как и в случае со светом, в процессе эволюции живущие на планете организмы научились различать узкий спектр звуковых волн. Звуковые волны расходятся циклически, переходя от одного пика волны к другому. Чем меньше количество циклов в единицу времени, тем ниже звук, а чем больше — тем звук выше. Единица частоты звука называется герц¹, и она измеряет количество циклов звуковой волны в секунду. Человеческое ухо различает довольно широкий диапазон звуков — от 20 до 20 000 Гц, а другие животные, обитающие на нашей планете, способны уловить и более низкие, и более высокие звуки.

животные. У высших животных мозг обрабатывает информацию, полученную от органов чувств.

Даже одноклеточные, которых мы называем бактериями и археями, чувствуют мир вокруг них. Это происходит потому, что среда постоянно контактирует со всем тем, что окружает эти крошечные организмы. Чтобы убедиться в наличии чувств у бактерий, можно посмотреть видео, как бактерия-хищник поедает свою жертву. Когда хищник начинает уничтожать добычу, поразительно, как быстро и избирательно он это делает. Это наглядная иллюстрация принципа: «Ты — мой вид, я тебя не трону... а ты — нет, тебя можно съесть». Еще больше удивляют видеоролики, где одноклеточные эукариоты преследуют и поедают дру-

¹ Любые колебания, не только звук. 1 Гц — один период в секунду. Период — длительность цикла в повторяющемся событии.

гие одноклеточные организмы. Но самым сильным впечатлением для меня стало видео о том, как бактерии «чувствуют» внешний мир, показывающее «линейные танцы» микробов, реагирующих на магнитное поле. Позвольте мне объяснить, как и почему они это делают.

Некоторые бактерии умеют считать, и эта способность требует, чтобы считающая клетка чувствовала свое окружение. Чувство кворума — одно из самых примитивных способов, позволяющих клеткам чувствовать и общаться друг с другом. Все живое на Земле использует молекулы для общения. И механизм восприятия кворума, и чувства так называемых более сложных организмов основаны на межмолекулярных взаимодействиях. У одноклеточных организмов есть молекулярная система индикации света, и некоторые микробы (как и более сложные животные) чувствуют магнитные поля. Магнитотактические бактерии ориентируются по магнитному полю Земли, потому что их клеточные мембраны содержат мелкие частицы сульфида железа, или магнетита (магнитосомы), заключенные в мембраноподобную органеллу, и выстраиваются в линию в этой оболочке. Но для линейного танца этим крошечным частицам недостаточно лишь встать в строй. Выровненные магнитосомы внутри бактерий располагаются параллельно, придавая бактериям характеристики магнитного диполя и превращая их в крошечные магниты с магнитными полюсами. Многие виды бактерий являются магнитотактическими. Этот феномен, по-видимому, возник только единожды в эволюционной истории микробов, поскольку большинство магнитотактических бактерий относится к типу протеобактерий и к двум другим близкородственным типам. Кроме того, гены, которые модулируют строительство этой органеллы, сгруппированы в геномах магнитотактических бактерий, что приводит к двум интересным аспектам эволюции этого явления.

Во-первых, плотная кластеризация генов, участвующих в формировании магнитосом и содержащих их органелл, указывает на единый механизм этого феномена (по крайней мере у типов, где обнаружены магнитотактические бактерии). Во-вторых, эти гены

1.3 | БАКТЕРИАЛЬНОЕ ЧУВСТВО КВОРУМА

Микробам часто необходимо чувствовать плотность популяции, чтобы реагировать на изменения окружающей среды. Классический пример этой способности — чувство кворума, присущее биолюминесцентным бактериям *Aliivibrio fischeri*, населяющим световой орган гавайского короткохвостого кальмара (*Euprymna scolopes*). Между кальмаром и бактериями установились мутуалистические (взаимовыгодные) отношения: кальмар возвращает в себе *A. fischeri*, а бактерии, в свою очередь, освещают фотогенный орган кальмара, используемый им для маскировки от хищников. Однако бактериям важно понимать, когда именно надо «зажечь свет»: «светить всегда, светить везде» — ужасное расточительство энергии. Поэтому в световом органе кальмара развился механизм регуляции экспрессии белков, продуцирующих биолюминесценцию, который использует хитрую способность бактерий ощущать размер своей популяции. Бактерии производят белок, называемый индуктором, который они идентифицируют благодаря наличию у них другого белка — рецептора. Когда рецептор и индуктор связываются друг с другом при помощи механизма «замок — ключ», происходит биолюминесцентная реакция, поскольку в бактериальном геноме постепенно «включается» цепочка генов. Когда в световом органе находится недостаточное количество *A. fischeri*, концентрация индуктора настолько низка, что тот не может эффективно связаться с рецептором и свет не генерируется. Такой вид восприятия происходит полностью на молекулярном уровне.

расположены на так называемом колонизационном участке ДНК, который может передвигаться по горизонтали к другим видам. Этот горизонтальный перенос способен осуществить и ускорить эволюцию магнитотактического признака у других бактерий.

Если никакое другое магнитное поле не мешает, бактерии выравниваются по магнитному полю Земли. Почему микробы делают это? Для выживания им необходимы питательные вещества, а зная направление магнитного поля, легче отыскать подходящую

питательную среду. Например, микробы, относящиеся к типам магнитотактических бактерий, жаждут оказаться в тепленьком местечке — в благотворной для них среде: бескислородной зоне или зоне с низким содержанием кислорода. Они эволюционировали в подобной среде и теперь при помощи сильных флагелл (жгутиков) перемещаются в ее поисках. Оказывается, из-за искривления Земли ее магнитное поле направлено не только с севера на юг, но и под углом к ее поверхности. И знание этого угла позволяет бактериям ориентироваться над и под землей. Способность чувствовать магнитное поле помогает магнитотактическим бактериям добраться к бескислородным зонам, находящимся глубоко в недрах, наиболее эффективным путем.

Что же происходит, когда микробы ошибочно реагируют не на магнитное поле Земли, а на какое-то другое? Исследователи Корейского института науки и техники создали крошечный аппарат в виде чашки Петри на платформе, под которой образуется магнитное поле. Магнитное устройство контролируемо вращается таким образом, что преодолевает магнитное поле Земли и управляет поведением бактерий. Магнитотактические бактерии помещаются в чашку Петри, джойстик заводит магнитное поле — и под ритм «Хлопкоглазого Джо»¹ бактерии пускаются в пляс: в лаборатории начинается линейный танец². Смотреть, как танцуют одноклеточные организмы — а они довольно неплохо это делают и демонстрируют достойную версию движений танца в линию, вращаясь в унисон слева направо и двигаясь вперед-назад, — весьма унижительно для такого плохого танцора, как я. Танец — это только метафора, конечно, и очень важно понять, что же именно стоит за ней.

Отдельные клетки должны знать, где они находятся в пространстве, с чем они вступают в контакт и когда именно. Поскольку миллиарды лет назад солнечный свет был преобладающим фактором воздействия на живые организмы, некоторым бактери-

¹ Народная американская песня *Cotton-Eyed Joe*.

² Посмотрите видео — <https://www.youtube.com/watch?v=3uUL4ooM6KI>.

ям необходимо было знать, где тот находится, чтобы использовать его как средство выживания. Поэтому отдельные клетки научились обнаруживать внешние факторы, такие как гравитация, свет и содержащиеся в окружающей среде химические вещества, довольно сложными и эффективными способами. Андрий Анишкин и его коллеги предположили, что тактильное восприятие в оригинальном смысле (как они его называют) служит хорошим аргументом в пользу того, что это первое и, возможно, самое важное чувство, которым наделена клетка. Но все, что касается порядка, в котором клетки и организмы развивали другие чувства, может быть только предположением. Хотя мы и можем придумать довольно логичные объяснения, почему и как клетки формировали тот или иной способ восприятия.

Для некоторых бактерий, как и для растений, свет — это «еда». Цианобактерии, или синезеленые водоросли, способны к фотосинтезу. Молекулы взаимодействуют со светом, поглощая фотоны, и именно за счет этого бактерии и выживают. Механизмы использования света в качестве пищи у растений и бактерий практически одинаковые. На первый взгляд это выглядит полной чужью, ведь бактерии и растения тесно не связаны, у них нет явных общих предков или потомков, что объяснило бы возможное наличие у растений характеристик, присутствующих у бактерий. Но все это лишь до тех пор, пока мы не рассмотрим происхождение хлоропласта — органеллы, превращающей свет в питательное вещество для клеток растений. По сути хлоропласт — это наследие древних цианобактерий, поглощенных клетками предшественников современных растений. Симбиоз, вызванный поглощенными цианобактериями, настолько хорошо сказался на жизни древней растительной клетки, что она застряла в эволюционном контексте и теперь представляет собой основу растительной жизни на планете. История того, как древние эукариотические клетки поглощали различные виды бактерий, сложна и иногда запутанна. Некоторые растительные клетки многократно поглощали другие клетки, и даже многократно поглощенные клетки поглощались снова и снова.

Другой способ использования света бактериями — это изменение молекулярных свойств класса молекул, называемых опсинами. Эти молекулы встроены в клеточные мембраны, где фотоны могут натолкнуться на них. Во внутренней структуре опсинов заперты еще более мелкие молекулы — хромофоры. Хромофор, цепляющийся за внутренности опсина, приводит большую молекулу, встроенную в клеточную мембрану, в специфическое неактивное состояние. Когда свет определенной длины волны попадает в клетку, он также натывается на хромофор и вызывает его смещение, а структура самого опсина изменяется, вызывая другие реакции в клетке.

У некоторых одноклеточных бактерий в клеточную мембрану встроена молекула родопсина, которая реагирует со светом. Но в отличие от более сложных организмов родопсин у бактерий действует как насос, который доставляет высокие концентрации ионов хлора или перемещает протоны в клетку, что, в свою очередь, изменяет способ дальнейшей жизнедеятельности клетки. У одноклеточных эукариот тоже есть родопсины, которые реагируют на попадание света. Родопсин бактерий довольно сильно отличается от опсинов высших эукариотов, поэтому неизвестно, являются ли опсины позвоночных продуктом его эволюции. Дело в том, что механизмы обнаружения света опсинами и родопсинами схожи и дают представление о том, как высшие животные воспринимают свет. Еще одна особенность заключается в том, что у одноклеточных организмов эти механизмы реализуются с помощью белков без централизованной обработки информации в мозге. «Решения», которые одноклеточный организм «принимает» под воздействием окружающей среды, — быстрые, химические и внутренние по отношению к отдельной клетке. Высшие организмы и одноклеточные добывают информацию из внешнего мира очень похожими способами, но вот обрабатывают они ее по-разному.

Многоклеточная жизнь появилась почти на 1,5 миллиарда лет позже одноклеточной. Сегодня существует большое количество одноклеточных эукариот, и схема их родства ясно показывает, что уже на ранних этапах эволюции было много случаев диверген-

ции между ними и многоклеточными животными и растениями. Это наблюдение справедливо, потому что не все одноклеточные эукариоты — ближайшие родственники и не все многоклеточные организмы происходят от одного общего предка. Некоторые одноклеточные эукариоты, например, более тесно связаны с растениями, чем с другими одноклеточными эукариотами. Взять хотя бы водоросли и одноклеточные эукариоты — хламидомонады («хлами», как ласково называют их ученые): и те и другие гораздо теснее связаны с растениями, чем с другими одноклеточными организмами, такими как амеба.

Растения довольно хорошо понимают сигналы раздражителей из окружающего мира, но для этого они развили иные механизмы, нежели животные. Отличный пример — подсолнух: если можете, потратьте несколько часов, наблюдая, как он реагирует на солнечный свет. Самый интересный момент происходит на рассвете, когда цветок медленно поворачивается туда, где ожидается восход солнца. Подсолнух очень точно определяет время и ловко передвигает свой цветочек на нужное место. Другой пример — мимоза, растение, реагирующее на прикосновения. А любой, кто видел «Лавку ужасов», легко вспомнит венерину мухоловку, которая быстро и жадно хватается добычу, необдуманно оказавшуюся поблизости с ее ловушкой (рис. 1.2). Однако у растений нет нервных клеток и, следовательно, нет мозга или нервной системы, как у животных. (Я делаю эти категоричные заявления о растениях и нервных системах, хотя знаю, что существует журнал под названием *Plant Neurobiology* («Нейробиология растений») и несколько институтов занимаются изучением одноименной науки. Но нейробиология растений и нейробиология животных все же фокусируются на разных факторах.)

Метафора становится важной при изучении реакции организмов на окружающую среду. Организм с «метафорическим мозгом», подобный растению, не обрабатывает информацию из внешнего мира так, как это делают позвоночные, и это неудивительно. Под метафорическим мозгом я подразумеваю систему, аналогичную мозгу позвоночных, но не являющуюся нейронной.

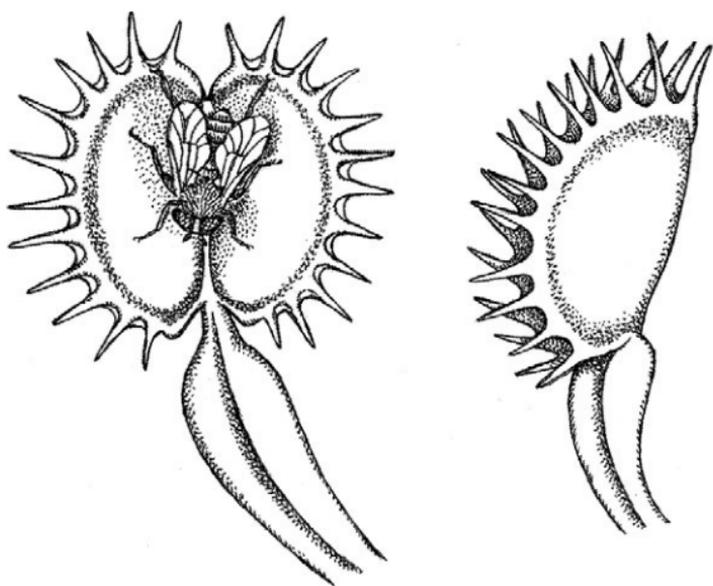


Рис. 1.2. Нейробиология растений или интеллектуальное поведение? Венерина мухоловка (*Dionaea muscipula*)

Именно эта способность реагировать на внешний мир побудила некоторых исследователей инициировать нейробиологический подход по отношению к растениям. Но очень трудно отрицать, что у растений нет мозга и нервной системы. Я предпочитаю признать, что растения довольно хорошо чувствуют внешний мир и у них есть некий способ интегрировать свое восприятие окружающей среды, но в функциональном структурном контексте у них нет мозга. С точки зрения эволюционной биологии можно сказать, что растительная версия нервной системы приближена к мозгу насекомого или позвоночного. Центральная сенсорная система растения — это метафора нервной системы беспозвоночных или позвоночных. С интеллектуальной точки зрения мне гораздо приятнее осознавать, что растения изобрели новый способ восприятия внешнего мира, не имеющий ничего общего с нервной системой. И действительно, когда мы начинаем исследовать пути, по которым развивались структуры и механизмы традиционных чувств у животных с нервной системой, эта гипотеза многократно подтверждается. Вероятно, надо согласиться с Майклом Полланом, ярким защитником растительной жизни на

планете, который предлагает говорить не о «нейробиологии растений», а скорее о «разумном поведении растений». И в этом контексте растения развили свои способности особым путем, без какого-либо эволюционного сходства с разумным поведением животных, за исключением использования некоторых основных молекулярных инструментов эволюционного инструментария, который есть у большинства многоклеточных эукариот. Разумное поведение позволяет растению воспринимать стимулы из окружающей среды, такие как свет или концентрация химических соединений, и интерпретировать их «интеллектуальным» образом. Нейронная основа разумного поведения растений — это просто еще одно решение для межклеточной коммуникации, на которое натолкнулась жизнь на Земле и которое развивалось как ответ на потребность в сенсорной связи с внешним миром.

Неудивительно, что организмы, не имеющие глаз, ушей, носа, кожи и рта, не могут видеть, слышать, обонять, осязать и ощущать вкус. Эти так называемые традиционные, или аристотелевские, чувства — сфера компетенции развитых животных. И потому организмы без этих функций фокусируют свои ощущения на других раздражителях окружающей среды, таких как электрические и магнитные поля и химические сигналы, которые ведут себя не так, как вкус и запах. Организмы, которые могут видеть, слышать, обонять, осязать и ощущать вкус, развили удивительный набор анатомических и физиологических особенностей, которые усиливают эти чувства. И разнообразие стимулов окружающей среды, которые жизнь подарила нам для восприятия внешнего мира, поражает воображение.

МОЗГ И ПЕРВОМОЗГ

Мозг (или его отсутствие) — от губки до человека

Губка видит все? Губка ничего не видит.
Лоуренс Тирни, актер

Древо жизни росло и разветвлялось, а на пути развития чувств возникали определенные этапы. К самым ранним из них относится эволюция межклеточной коммуникации посредством молекулярных процессов, таких как чувство кворума. Затем пришло время наборов генов, отвечающих за выполнение специфических клеточных функций, то есть того самого молекулярного инструментария, благодаря которому информация передается через одиночные клетки. Потом эволюционировали многоклеточные организмы, клетки которых стали взаимодействовать между собой с помощью сигнальной трансдукции. После возникновения многоклеточности открылись новые возможности коммуникации клеток, и они значительно повлияли на биологию наших прямых предков-эукариот. К важным вехам эволюции также относятся потенциал действия, синапс, дифференцированные нервные клетки, нейронные сети, скопления нейронов и специализированная нервная система. И, несмотря на то что все эти этапы развития (то есть все, чего мы достигли в процессе эволюции нашей ветви) могут показаться дорогой к совершенству, это всего лишь промежуточные остановки. Другие ветви тоже развивались, но стадии эволюции нашей нервной системы не имеют к ним ни малейшего отношения.

Чарльз Дарвин уподобил отношения организмов с «великим древом жизни», чтобы наглядно показать взаимосвязь всех организмов на планете через общее происхождение и дивергенцию. Биологи взяли на вооружение концепцию «великого древа жизни» для отслеживания эволюции признаков. Наблюдая за случаями дивергенции организмов и признаков, имеющих отношение к нервной системе, мы получаем довольно точную картину, как развивался мозг в целом и наш мозг в частности.

Самые ранние ветви древа, иллюстрирующего эволюцию животных, включают губку и небольшие организмы, относящиеся к типу пластинчатых и по форме напоминающие блин. Некоторые исследователи полагают, что все губки — родственники друг другу благодаря общему предку. Другие же считают, что существовали две линии развития губок. Доподлинно известно, что губки имеют примерно восемь типов клеток и ни один из них не является нейронным, именно поэтому у них и нет мозга. У пластинчатых, в свою очередь, четыре типа клеток, среди которых нет даже одного нейронного, поэтому и у них тоже не может быть мозга. Но вот что интересно: у этих двух древних животных, находящихся у основания древа, есть большое количество генов, необходимых для создания нервных клеток, просто они их не используют. По всей видимости, они нашли другое применение генам, которые другие животные направляют на строительство нейронов. И губки, и пластинчатые чувствуют изменения окружающей среды и реагируют на них, поэтому эти организмы можно назвать чувствующими, несмотря на отсутствие мозга и нервной системы. Губки «чихают», когда ощущают контакт с какими-то частицами. Это «чихание» представляет собой очень эффектное зрелище, но весь процесс занимает около часа, поэтому наблюдать за губками лучше через замедленную съемку. Пластинчатые очень охочи до еды и весьма преуспели в ее добыче — и это при отсутствии мозга.

Гребневики, или ктенофоры, — невероятно интересные существа. Выглядят они чертовски круто, и считается, что это первая группа животных, отклонившаяся в развитии от одноклеточных предков — эукариот. У них есть несколько типов клеток, в том чис-

ле и нервные клетки, есть нервная система, но нет централизованного скопления клеток, которые формируют мозг. Если ктенофоры действительно являются первыми животными, чья эволюция устремилась по другой ветке древа жизни, то тогда вырисовывается любопытный сценарий развития событий. Первый момент: нервные системы гребневиков и других животных очень схожи (за исключением губок и пластинчатых). Второй момент: нервную систему относительно легко утратить, как это случилось в ветви, по которой развивались губчатые и пластинчатые. Этот пример показывает, как применение концепции общих предков и древа жизни позволяет нам проанализировать значимые изменения нервной системы, произошедшие при дивергенции животных.

Однако способы взаимодействия нервных клеток у нашей ветки и более низших, «мягких», животных одни и те же. Похоже,

2.1 | ПОТЕНЦИАЛ ДЕЙСТВИЯ

Потенциал действия — это физиологическая реакция клетки, при которой электрический разряд в ней повышается и понижается. У более сложных животных есть регулируемая мембраной разница электрического потенциала между внутренней и внешней сторонами клетки. Мембрана поддерживает напряжение внутри клетки на уровне минус 70 милливольт относительно внешней среды, и это называется состоянием покоя. Когда клетку каким-то образом стимулируют извне, разница потенциалов снаружи и внутри повышается примерно на 110 милливольт и становится равна 40 милливольтам. В результате заряд внутри клетки повышается. Затем напряжение резко падает гораздо ниже значения состояния покоя, а после возвращается к изначальным 70 милливольтам. Повышение и понижение потенциала действия происходит очень последовательно, и именно так нервные импульсы или электрические сигналы передаются от клетки к клетке по всей нервной системе. Потенциалы действия также важны для связи нервной системы с сенсорной и моторной системами.

Но действительно ли мозг можно назвать признаком билатеральных? Считается, что общая структура мозга первичноротых отличается от более развитого мозга вторичноротых. У общего предка билатеральных была нервная сеть, которая охватывала большую часть его организма, а в ее переднем отделе находилось некое скопление нервных клеток, которое нейробиологи назвали бы мозгом. Некоторые нейроанатомы — специалисты по нервной системе — предполагают, что общий предок билатеральных даже имел сложную структуру, состоявшую из трех отделов.

Вполне возможно, что скопление клеток в переднем отделе нервной системы предка билатеральных начало развиваться в двух направлениях, что привело к появлению первичноротых и вторичноротых. Чтобы как-то отличать мозг первичноротых от развитого и структурированного мозга вторичноротых, я часто называю тот первомозгом. Мы можем использовать насекомых в качестве типовой системы для расшифровки того, как сенсорная информация собирается из внешнего мира и превращается в нервные импульсы, но, как только та попадает в мозг в случае вторичноротых или в первомозг у первичноротых, сходство между этими двумя типами нейронных центров заканчивается. Вероятнее всего, сбор информации органами чувств и передача ее для обработки — это единственное, что можно сопоставить у мозга и первомозга. Судя по всему, наши билатеральные предки обладали довольно обширным арсеналом сенсорных инструментов, и наблюдения за такой удивительной дифференциацией мозга и первомозга после дивергенции билатеральных ясно показывают, что этот инструментарий использовался различным образом по мере того, как один вид появлялся вслед за другим. Справедливости ради надо отметить, что некоторые исследователи приводят доводы в пользу гомологии на основе другой важной информации. Первичноротые, такие как фруктовая мушка дрозофила (*Drosophila melanogaster*), для нейронной обработки используют многие из тех же генов, что и вторичноротые. Кроме того, они имеют очень похожие, хотя и неидентичные структуры, где нервные клетки вступают в контакт друг с другом (так

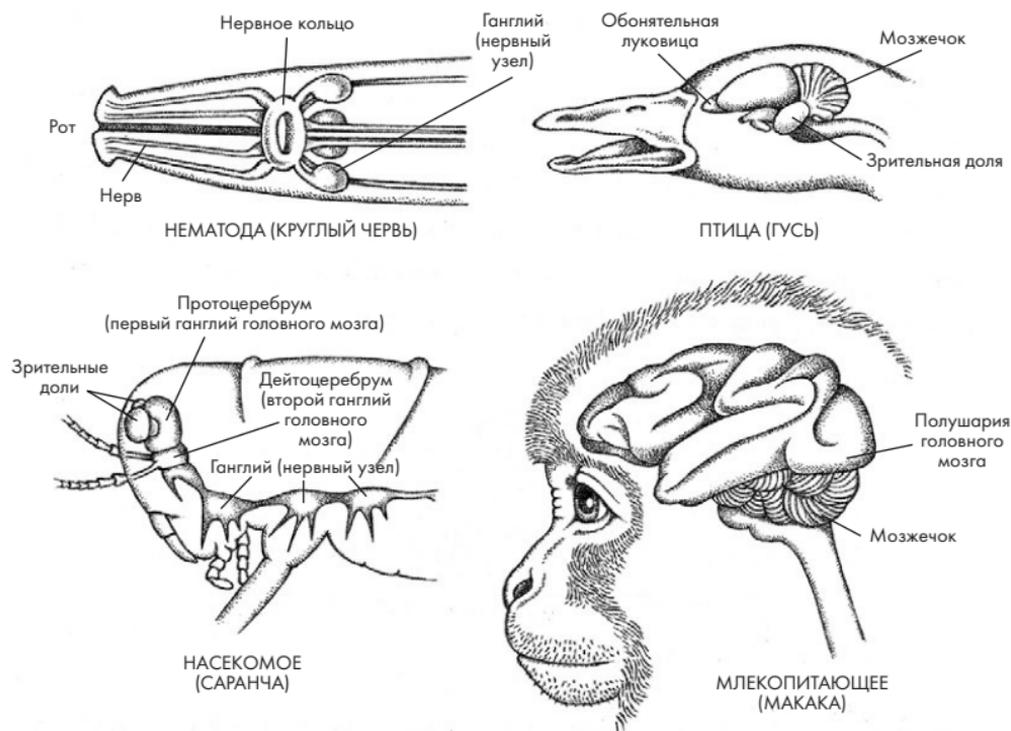


Рис. 2.1. Сравнение мозга позвоночных (птицы и примата) с мозгом нематоды (круглого червя) и насекомого

называемые синапсы — см. вставку 2.2). Но, если вдуматься, это любопытная мысль: сложный мозг сформировался как минимум дважды на этой планете — в ветке первичноротых и у вторичноротых (рис. 2.1).

Если не считать мозг первичноротых тем же типом мозга, что и наш, или по крайней мере не называть его триединым, то можно использовать мозг, состоящий из трех частей, в качестве эвристического приема, чтобы понять, как эволюционировал мозг позвоночных. У организмов ранних веток вторичноротых, таких как морские звезды или морские ежи, есть нервные клетки, но они распределены по всему телу без центрального скопления клеток, которое можно было бы назвать мозгом. Некоторые ученые проявляют верх педантизма и считают, что у этих организмов, известных также как иглокожие, есть своего рода «распределенный мозг».

Следующей группой животных, которые поучаствовали в «подвешивании» человеческого мозга на древо жизни, счита-

ются родственники иглокожих — хордовые (Chordata). У всех ее представителей, самыми первыми из которых были личиночнохордовые и головохордовые, есть нервные трубки. Личиночнохордовые, или оболочники, — довольно странные существа. Ярким представителем этого подтипа можно назвать одиночную асцидию, относящуюся к группе туникатов, получивших это название из-за защитной оболочки (туники), которая образуется у взрослых особей из материала, похожего на целлюлозу. Одиночная асцидия (как и земноводные) проходит личиночную стадию, во время которой развивается мозговой пузырь, и это позволяет нам говорить, что у нее уже есть место для мозга, хотя самого мозга там нет. Как ни странно, но, превращаясь во взрослую особь,

2.2 | СИНАПСЫ

Синапсы — это точки контакта, которые позволяют одному нейрону связываться с другим посредством передачи электрического сигнала. Механизм появления этого сигнала довольно сложный (см. вставку 2.1). Клетка, передающая электрический заряд, называется пресинаптической, а получающая его — постсинаптической. Ученые полагают, что взаимодействие клеток других типов, таких как мышечные клетки, с нейронами тоже осуществляется через синапсы.

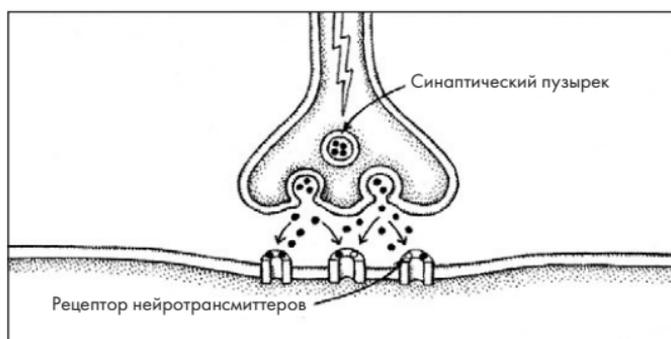


Рис. 2.2. Структура синапса. Пресинаптическая клетка содержит синаптический пузырек (везикулу), выпускающий нейротрансмиттеры, а мембрана постсинаптической клетки содержит клеточный рецептор — белок

личинка одиночной асцидии устраивает пир из собственного мозга. У личинки нет внешнего рта, чтобы заглатывать пищу, и поэтому она вынуждена искать иной способ, чтобы ее получить. А поскольку в дальнейшем крошечный комочек нервных клеток, составляющих мозговой пузырь, никак не используется взрослой асцидией, личинка реабсорбирует эту ткань. Да, мозга у них нет, но зато есть нотохорд, хотя это еще и не позвоночный столб, который на древе жизни появляется позже. У головохордовых тоже есть нервные трубки, но опять-таки нет позвоночника. Трудно однозначно утверждать, что у одного из лучших представителей этого подтипа — ланцетника — есть мозг, и на практике анатомы называют то, что можно у него считать таковым, утолщением нервной трубки. Ведь в буквальном смысле это просто небольшая выпуклость на нотохорде в области головы ланцетника.

У позвоночных есть позвоночный столб, или позвоночник, и полностью развитая нервная трубка. Одно время нейробиологам было трудно смириться с тем, что эволюция мозга позвоночных была линейной с поэтапным добавлением все более сложных деталей. Лимбическая система и кора головного мозга — два наглядных примера более сложно организованных нейронных образований, которые постепенно появились у общих предков в результате дивергенции. Можно было бы предположить, что усложненные структуры или процессы должны развиваться из простых, но на практике совсем не обязательно, что потомки всегда устроены сложнее, чем их предки. Да и результатом эволюции может быть некая упрощенная версия прототипа. Тем не менее, если отправной точкой становится примитивная структура, единственный путь ее развития — обрести дополнительные детали. И кажется, мозг позвоночных эволюционировал именно так: путем наслаивания новых структур. Проблема в том, что непонятно, как и когда были добавлены эти слои. Схемы эволюции мозга всегда включают в себя изображение трех его основных частей, что приводит к теории триединого мозга. По определенным критериям выделяют три главных отдела мозга: ствол и мозжечок (называемые Р-комплексом, где «Р» — от слова «рептилия»), лимбическую систему и кору.

Это довольно произвольное деление, и, видимо, именно поэтому некоторые нейробиологи отрицают трехчастное строение мозга. Тем не менее в качестве эвристического подхода использование триединой модели мозга позвоночных работает довольно неплохо. Но даже с учетом этого все равно остается спорным вопрос: как развивался трехчастный мозг и действительно ли он трехчастный?

Мозг предков всех позвоночных выглядел довольно примитивно, и у него либо не было коры, либо она была очень маленькая, а мозжечок находился в зачаточном состоянии. В основном поведение предков контролировалось стволом мозга и мозжечком, отвечающими за основные функции организма, такие как сердцебиение и дыхание. Обладали предки и базовыми способностями реагировать на внешний мир: мозг мог распознавать запахи, звуки и объекты. Это было то, что в классической теории триединого мозга называется рептильным мозгом. Последними слоями в схеме трехчастного мозга стали мозги палеомлекопитающих и неомлекопитающих. Большинство из тех, кто работает в сфере биологии развития, исходя из этих названий сделает вывод, что два следующих важных предка — это давно вымершие млекопитающие (млекопитающие палеоцена и неоцена). Недостаток этой схемы в том, что в ней отсутствуют птицы, у которых довольно сложные нейронные способы взаимодействия с внешним миром и чей мозг не вписывается в общий континуум. Поэтому необходимо либо пересмотреть названия предков мозга, либо предположить, как мы уже делали раньше, что мозг птиц — это другая надстройка над мозгом ящериц и его не следует отождествлять с мозгом млекопитающих. Можно переименовать рептильный мозг в мозг рыб и попытаться сделать шаг в сторону на древе жизни. Вполне возможно, что следующим будет рептильный/птичий мозг, а затем — прото/неомозг млекопитающих. Проблема этой теории в том, что некоторые биологи-эволюционисты не выделяют рыб в отдельную группу. Почему? Несмотря на то что название «рыба» носит дескриптивный характер, оно не дефинитивно, то есть не определяет какую-то группу организмов, отличающуюся от других по неким признакам, которые обычно учитывают ученые-таксономисты при

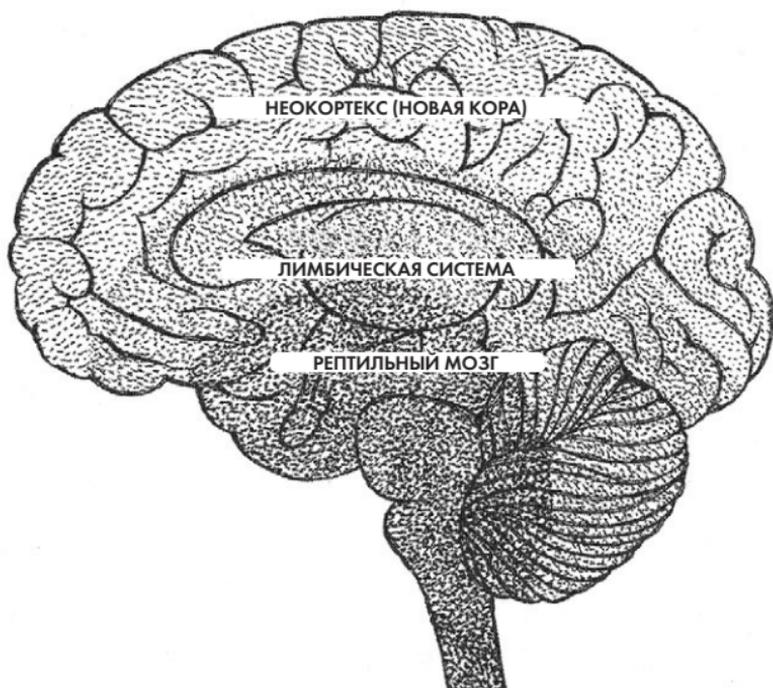


Рис. 2.3. Трехмозговый мозг

систематизации. Но решить эту проблему довольно просто: надо или окрестить основные рода рыб как-то иначе, или называть всех потомков общего предка тех, кого мы привыкли считать рыбой, рыбами. Включая людей, разумеется. Так выплюнуть наживку или проглотить ее? Пока давайте-ка не будем спешить попасться на крючок и посмотрим на трехмозговый мозг в ином ракурсе.

Если бы кто-то проанализировал все названия, которые нейробиологи давали трем главным отделам мозга, он столкнулся бы как с неким произволом, так и с высокой степенью субъективности — в зависимости от того, какие именно виды имеют те или иные структуры. И это недвусмысленно свидетельствует, что многим ученым нравится идея существования трех основных частей мозга (рис. 2.3).

Рассмотрим дивергенцию позвоночных в надежде, что это может придать нашему обсуждению некоторую объективность. После того как у общего предка рыб, амфибий, рептилий, птиц и млекопитающих сформировались основные анатомические структуры основы головного мозга (внутренний мозг рыбы), по-

явился следующий общий предок, породивший мозг всех высших позвоночных (рептилий, птиц и млекопитающих). И на этом этапе добавился еще один слой мозга, позволивший использовать более сложные способы обработки сигналов внешнего мира, поступающих от органов чувств, — наш рептильный мозг. Это привело к развитию внутренней области мозга, которая включала в себя то, что обычно называют лимбической системой. Подобный порядок отлично вписывается в теорию триединого мозга, если учесть, что лимбическая система есть у всех вышеупомянутых позвоночных. Впоследствии лимбическая система стала решать очень интересные задачи, связанные с реагированием на окружающую среду. Последней сформировалась кора головного мозга, которая у всех потомков общего предка разрасталась по-разному. Важно отметить, что неокортекс специфическим образом изменяется у потомков того самого общего предка, о чем свидетельствуют экспансия неокортекса у птиц и млекопитающих и отсутствие его расширения у рептилий. Короче говоря, неокортекс птиц — это другой вид расширения коры, отличный от экспансии неокортекса млекопитающих.

Все это означает, что сложная лимбическая система, вероятно, возникла у общего предка птиц, рептилий и млекопитающих, так же как и крошечная первичная кора. Трудно представить, что два предка (первый с крошечной первичной корой, но без лимбической системы, а второй без того и другого) существовали отдельно друг от друга, и поэтому, хотя функция и анатомия мозга являются трехсторонними, эти дополнения нельзя интерпретировать как последовательные. Часть проблемы кроется в том, как птицы связаны с другими высшими позвоночными. И опять же, должно быть, из-за птиц некоторые нейробиологи с легким пренебрежением относятся к слоистой трехчастной структуре. Но есть еще два вида животных, которые тоже нарушают эту схему: черепахи и амфибии. Черепахи, как и другие организмы с лимбической системой, имеют ретикулярное таламическое ядро (скопление нервных клеток вокруг той части лимбической системы, которая называется таламусом), но у них оно обозначено не так хорошо, как

у птиц или млекопитающих. У амфибий, другого особого класса, есть некоторые структуры, напоминающие лимбическую систему, но они не так хорошо разделены на части, как даже самые примитивные лимбические системы рептилий. Подводя итог, скажу, что теория триединого строения мозга важна с эвристической точки зрения. Что же делать? Перестать выделять эту «троицу» или использовать трехчастный мозг как хорошее устройство для понимания очень сложного процесса? Думаю, что, до тех пор пока мы осознаем все ограничения представления триединого мозга и не пытаемся заставить аналогичные структуры быть гомологичными, использование теории триединого мозга в качестве исследовательской установки — дорога в правильном направлении.

Как развивался сложный мозг, интегрирующий сенсорную информацию из внешнего мира? Современные биологи стараются не приписывать естественному отбору слишком уж многое из достижений эволюции, которые мы видим в природе. В конце 70-х годов XX века Ричард Левонтин и Стивен Джей Гулд пришли к выводу, что большая часть эволюционной биологии, особенно эволюционной биологии человека, состоит из «простых сказок»¹. Они назвали это парадигмой Панглосса — в честь доктора Панглосса из романа Вольтера «Кандид». Доктор Панглосс во всем видел предназначение («Все, что ни делается, все к лучшему в этом лучшем из миров»), а адапционистская программа, которую критиковали Левонтин и Гулд, была в то время настолько распространенной в биологии, что это название попало прямо в точку.

Я хочу упростить потенциал естественного отбора в эволюции интеграции чувств с восприятием. Но имейте в виду, что не все особенности, которые мы наблюдаем в природе, являются результатом естественного отбора. Кроме того, эволюция не стремится к совершенству, как позволяет предположить диапазон наших чувств. Как раз наоборот: эволюционный процесс просто находит оптимальное решение для задачи, поставленной внешним миром,

¹ Отсылка к сборнику историй Р. Кипплинга «Сказки просто так» (Just So Stories for Little Children, 1902). — *Прим. ред.*

и, следовательно, многие наблюдаемые в природе характеристики — это не идеально возможный вариант, а скорее полумеры, которые быстро и эффективно помогли справиться с возникшими проблемами.

Давайте трижды подумаем и разделим характерные для организмов взаимодействия с окружающей средой на три основные категории — так мы упростим понимание. Эту идею предложил мой друг-палеонтолог, человек с очень изобретательным умом. Когда я был доцентом в Йельском университете, он, тогда еще молодой аспирант, проходил у меня курс. Размышлял он довольно просто, и, вероятно, именно это помогло ему придумать более чем упрощенную схему того, как животные выживают в мире природы. Его схема начинается с того, что животное вступает в контакт с другим организмом. Чтобы повысить выживаемость вида, у животного-наблюдателя возникает необходимость классифицировать чужака. Это просто. Если незнакомец — представитель противоположного пола, то он маркируется как «партнер» («я спариваюсь с ним»). Если наблюдатель считает чужака опасным, то тот попадает в категорию «враг» («я убегаю от него»). Последний возможный вариант — «пища» («я его ем»).

По мере накопления опыта организм, конечно, будет переосмысливать свои интерпретации каждой из категорий. Например, наши предки *Homo sapiens* изменили критерии для «партнера», и для продолжения рода стало не важно, принадлежит ли незнакомец к тому же виду или нет. Если чужак стоял вертикально на двух ногах, то он автоматически классифицировался как потенциальный партнер, о чем свидетельствуют данные секвенирования генома, указывающие на вероятность скрещивания нашего вида с архаичными людьми, такими как неандертальцы. А вот категория «враг», пожалуй, самая непредсказуемая: огромный на вид чужак частенько совсем не опасен для наблюдателя и, вероятно, даже полезен, а маленькое милое существо вполне может оказаться злобным и агрессивным. Кроме того, иногда наблюдателю хочется прочь бежать и от представителей своего рода, и это легко понять. Да и с «пищей» тоже не все так просто: для принятия ре-

шения нередко необходимо обнюхать незнакомца, попробовать его на вкус или хотя бы хорошенько рассмотреть. Чем быстрее и эффективнее организмы определяют, в какую из трех этих категорий поместить других живых существ из своего ближайшего окружения, тем у них больше шансов выжить и передать свои гены следующему поколению. Эволюционируют популяции, а не отдельные особи (индивиды живут и умирают, а не эволюционируют). Тот факт, что популяции эволюционируют, означает, что каждая из трех основных категорий классификации вариативна и зависит от приобретенного опыта индивидов. Вариация — это то, над чем работает естественный отбор. Она зарождается из генетического состава популяции: часто возникающая мутация вызывает вариацию. Вариация будет проявляться в точном соответствии с опробованной предыдущими поколениями классификацией встречающихся организмов по категориям и необходимым для адекватной реакции временем. Если особь в популяции медлительна и неразборчива, она проигрывает! И она, и гены, которые могли бы быть переданы популяции следующего поколения, исчезают.

Несмотря на то что это слишком упрощенная схема, три категории в какой-то степени действительно существуют. Конечно, есть и другая классификация, и даже смешение категорий. Но смысл в том, чтобы осознать: наш мозг постоянно интерпретирует происходящее, классифицируя все контакты с представителями окружающего мира (включая растения и микробы) по категориям, которые я описываю, и его эволюция направлена на то, чтобы делать это как можно быстрее. Фактически даже незначительное изменение времени реакции на принятие решения может повлиять на то, выживет ли организм или погибнет. Этот чрезвычайно простой пример может утвердить нас во мнении, что естественный отбор — единственное, что работает в природе. Но, как обсуждалось ранее, важно избегать панглоссианского взгляда на мир; случайность играет огромную роль в том, как работает эволюция и как эти три категории могут меняться у разных видов.

Чарльз Дарвин сосредоточил большую часть своей интеллектуальной энергии на естественном отборе, и спасибо ему за это,

потому что он стал первым (вместе с Альфредом Расселом Уоллесом), кто придумал механизм, с помощью которого эволюция могла бы работать. Он даже назвал свою вышедшую в 1859 году книгу «О происхождении видов» одним сплошным аргументом в пользу существования эволюции путем естественного отбора. Эта теория развития жизни на планете была преобладающей частью эволюционной парадигмы вплоть до 1960–1970-х годов, пока Мотоо Кимура и другие ученые не начали внедрять в эволюционную биологию идеи о том, что случайные факторы также участвуют в изменении организмов на планете. Эта сила природы называется дрейфом генов, или генетическим дрейфом.

Идея генетического дрейфа пришла из теории вероятности, она предполагает, что эволюционные процессы подобны проблемам составления выборки. В любом процессе отбора существует конечная вероятность того, что в результате будет получена смещенная выборка. В большинстве случаев конечная вероятность мала по сравнению с силой естественного отбора, но иногда так называемое отклонение выборки может происходить с высокой вероятностью. Это случается, когда популяция очень мала. Посмотрим на это с другой стороны. Если бы я поспорил, что сто раз подряд брошу монету орлом вверх, то каждый раз, когда она зависала бы в воздухе, я вздрагивал бы от ужаса. Вероятность того, что сто раз подряд выпадет именно орел, хоть и конечна, но очень мала. А вот если бы я поспорил, что выброшу орла два раза подряд, мои шансы на выигрыш сильно бы возросли. Исследователи с легкостью начали замечать генетический дрейф или отклонение выборки во многих естественных процессах и интегрировать их влияние на эволюцию организмов. В настоящее время считается, что дрейф генов и естественный отбор совместно работают над формированием генетических и фенотипических изменений в природе.

Чувства и мозг организмов тоже испытали на себе силы отбора и дрейфа. Более того, они были сформированы этими силами, и роль тех оказалась такой значительной, что если умолчать об этих двух факторах эволюции, то и рассказывать было бы нечего.

ОБЕЗЬЯНОУНКУЛ

Осязательные способности и чувство
равновесия у животных

Ничего из того, что мы используем, слышим или к чему прикасаемся, невозможно выразить словами, которые так же точно передавали бы то, что дано нам в ощущениях.

ХАННА АРЕНДТ, философ

Когда развивается зародыш млекопитающего, каждую минуту у него образуется огромное количество клеток мозга. У человеческого эмбриона это число примерно равно 250 000, поэтому к моменту рождения ребенка его мозг состоит уже из ста миллиардов клеток. Как устроены эти клетки и как они поддерживают работу всего организма — существенная часть истории чувств. Важно отметить, что большая часть человеческого мозга занимается передачей и обработкой сенсорной информации. Как нервные клетки запрограммированы и что они делают, зависит от того, как развивается мозг. Каждая сенсорная функция находится в определенном участке мозга, и это расположение — увлекательная карта чувств.

Исследователи мозга по капле собирают информацию, правдами и неправдами выжимая ее из всех доступных источников. Но это непросто: наблюдать за структурой мозга лучше всего, вынув его из черепа, и подобное было абсолютно невозможно на ранних этапах изучения активного мозга. Однако один ученый нашел выход из положения: чтобы понять локализацию функций головного мозга у пациентов, находящихся на операционном столе, он применил оригинальный подход. Доктор Уайлдер

Пенфилд сосредоточился на двух небольших областях мозга, называемых «сенсорная и моторная полоски». Пенфилд умер задолго до выхода фильма «Ганнибал»¹, но он уже знал то, о чем говорил доктор Лектер в предпоследней сцене: «Если это вас беспокоит, Клариса, мозг не чувствует боли». После сей впечатляющей фразы Лектер демонстрирует этот феномен на не слишком приятном агенте Крендлере, заставляя того съесть кусочек собственного мозга. Вот это знание об отсутствии ощущения боли в мозге и использовал Пенфилд в своих исследованиях, благодаря чему написал уникальную работу по когнитивной психологии.

Пенфилд был нейрохирургом, и, перед тем как приступить к самой операции, когда череп пациента уже был вскрыт, а сенсорные и моторные полоски были видны и доступны для прикосновений, он последовательно их массировал. Пациент в тот момент бодрствовал, как и Крендлер в той сцене из «Ганнибала», и Пенфилд мог спросить его, что же происходит после стимуляции. Так, например, после массажа определенной части сенсорной области пациент говорил: «Я ощущаю покалывание в пальцах». Больше 1000 человек прошли через руки Пенфилда за время его карьеры, и он кропотливо обработал все свои наблюдения, записав информацию о 120 пациентах. В итоге, используя этот специфический метод, ученый довольно точно и тщательно отобразил локализацию исследуемых областей мозга. «Карта» — идеально подходящее название для того, что Пенфилд сделал, но то, как он визуализировал результаты своей мозговой щекотки, выглядит несколько кошмарно. Оценив размеры нервной ткани, выделенной для восприятия в одном случае и для контроля двигательной активности — во втором, он пригласил художницу, миссис Х. П. Кэнтли, которая в 1937 году начала рисовать очень странных на вид существ, называемых гомункулами.

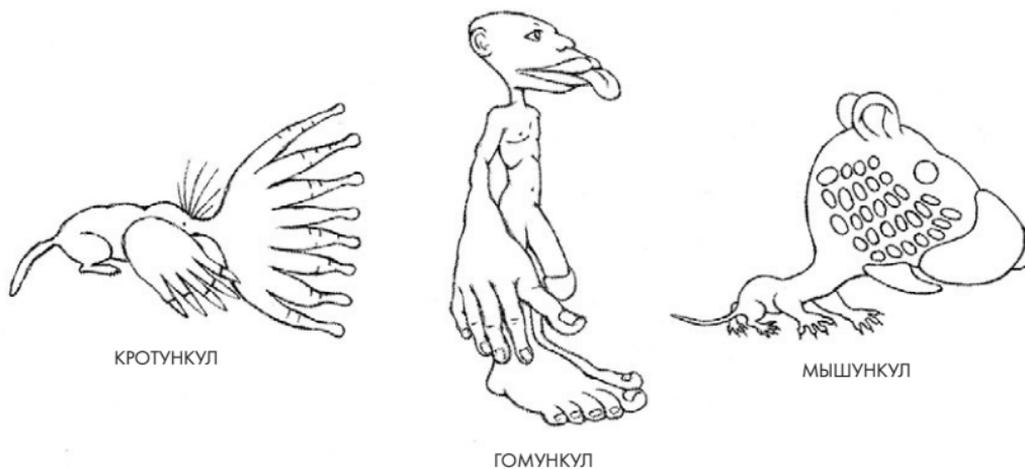
¹ Речь идет о криминальном триллере режиссера Ридли Скотта, вышедшем на экраны в 2001 году, сиквел фильма 1991 года «Молчание ягнят».

Гомункул, иллюстрирующий сенсорную зону коры головного мозга, отличался от того, который представлял моторную полосу, потому что наши сенсорные и двигательные возможности не всегда напрямую повторяют друг друга. Чтобы контролировать движения пальцев и чтобы ими ощущать внешний мир, мы используем разный объем коры. Хотя, как выяснилось, рисунки Кэнтли зачастую были неточны. На это указал психолог Ричард Григгс: иногда они основаны на данных левого полушария, но при этом относятся к левой половине тела гомункула — и это ошибка, потому что функционально левая часть мозга контролирует правую половину тела. Также Григгс отметил, что, хотя Кэнтли никогда не рисовала гомункула-женщину, в конце 80-х годов XX века на классических рисунках появилось изображение левой женской груди. Возникновение этой детали лишь частично корректирует пристрастие Пенфилда к гомункулам-мужчинам. Фактически только одна десятая часть обследованных пациентов были специально отмечены им как женщины. В 2012 году четыре нейробиолога-женщины обсудили эту гендерную предвзятость и отметили отсутствие в литературе женского персонажа, подобного гомункулу. Они призвали ценить существующие исключительные различия в сенсорном составе женщин и мужчин. Но, даже учитывая эту дискриминацию по половому признаку, нельзя не отметить, что гомункул, изображающий сенсорные области человека, выглядит более чем странно. Поскольку все же данные были получены в основном от мужчин, я буду использовать формы местоимения мужского рода. У гомункула огромные руки, сильно увеличенные в размерах губы и язык и просто гигантский пенис. При этом у него крайне короткие ноги и истощенное на вид туловище. Это несуразное существо демонстрирует, что большая часть сенсорной области в человеческом мозге отводится пальцам, губам и гениталиям (гениталии гомункула-женщины были бы примерно такими же крупными, как и ее ступни).

С конца 40-х годов XX века было описано столько гомункулов млекопитающих, что они могли бы заполнить небольшой зоопарк: утконос, кролик, землеройка, мышь, летучая мышь, кошка, соба-

ка и обезьяна. Крысункул, утконосункул и обезьяноункул (крыса, утконос и обезьяна соответственно) — это всего лишь несколько странных названий еще более странных рисунков. Быть может, самые отвратительные среди всех суперчувствительных «-ункулов» — те млекопитающие, которые живут в земле или используют сенсорный аппарат своих рыл для интерпретации мира. Крот-звездонос и сам по себе выглядит эксцентрично, что уж говорить о кротункуле, изображающем его. Мордочка этого землеройного животного украшена двадцатью двумя кожными наростами (по одиннадцать с каждой стороны), напоминающими звезду. Те, словно лучики, расходятся из центра его морды, и если пронумеровать их от одного до одиннадцати, то одиннадцатым окажется самый маленький нарост в нижней части морды. Когда крот движется по норе, лучики непрерывно вытягиваются и касаются всех объектов, с которыми он сталкивается. Предполагается, что лучи могут сделать больше дюжины «касаний» в секунду. Два уникальных аспекта строения этих наростов гарантируют, что крот глубоко в контакте с окружающей средой. Прежде всего на каждом лучике есть более сотни мелких нервных окончаний — структур, называемых органом Эймера. Они распределены по всему наросту и покрыты так называемыми осязательными ямками. (В случае со зрением центральная ямка сетчатки глаза служит для повышения резкости в центре поля зрения. Подробнее об этом я расскажу в главе 8.) Фактически лучик номер одиннадцать — это часть осязательной ямки. Всякий раз, когда лучи 1–10 встречают что-то и впрямь интересненькое для крота, одиннадцатый лучик начинает действовать, исследуя новый предмет несколькими касаниями.

Когда смотришь на этого диковинного зверька, возникают вопросы: как и почему? Из всех хищников на планете крот-звездонос — самый злобный, ненасытный и стремительный едок из всех (в процентном соотношении размера и веса, разумеется). Он всеяден и пожирает все на своем пути: шаг за шагом, не пропуская ни единой крошки. Если вы считаете, что это гепард быстро убивает, то знайте: вот то маленькое существо с лучиками



КРОТУНКУЛ

ГОМУНКУЛ

МЫШУНКУЛ

Рис. 3.1. Кротункул (крот-звездонос), гомункул и мышункул. Пятнышки на голове у мышункула — это баррелы

может ощупать, идентифицировать и заглотить добычу всего за 120 миллисекунд. В интернете много видео об этом. А вот если бы этот крот при подобном хищном поведении действовал хотя бы на полсекунды медленнее, он не смог бы поглощать достаточное количество пищи, необходимое для его быстрого метаболизма. Экстремальность и скорость, с которыми этот вид эволюционировал, ошеломляют.

А еще есть бедный голый землекоп: внешне он похож на маленькую крысу, живет под землей, как крот, но при этом не является ни крысой, ни кротом. Голые землекопы теснее связаны с дикобразами, шиншиллами и морскими свинками, чем с любыми другими млекопитающими. Недавно их выделили в отдельное семейство — землекоповых (*Heterocephalidae*), что означает, что они абсолютно уникальны. А если всего этого недостаточно, чтобы удивить вас, то стоит еще добавить, что вообще-то они и не голые: их тело покрыто жесткими торчащими тактильными ворсинками, похожими на пушок над верхней губой двенадцатилетнего мальчика, который пытается отрастить усы. Однако существует и землекопункул. В 2002 году Кеннет Катания и Фиона Ремпл явили миру гомункула-землекопа. Картинку нарисовала миссис Кэнтли нашего времени — Лана Финч, и изображение получи-

лось воплощением ночного кошмара, наглядно показывающего все «прелести» образа жизни этого вида. У голого землекопа крошечные глазки, и раньше считалось, что они нефункциональны, но в 2010 году исследование показало, что землекопы действительно могут использовать свои глазки для обнаружения света. Слух у них очень чуткий, и в своих искусно построенных туннелях они слышат даже едва уловимое жужжание нерасторопного насекомого.

Голые землекопы — животные социальные, и у них уникальная среди млекопитающих иерархия. В каждой колонии есть матка-королева и пара самцов-производителей. Остальные члены колонии — рабочие особи, но и среди этой касты есть разделение функций. Матка производит потомство каждые два месяца, но отличить ее от других обитателей колонии можно не только по наличию детенышей и огромному размеру: подданные, вытягиваясь в струнку у стенок туннеля, всегда пропускают королеву, когда та патрулирует свои владения. Почти треть соматосенсорного аппарата голого землекопа сосредоточена на его зубах, которые он пускает в ход всегда и везде, за исключением разве что спаривания (впрочем, есть доказательства, что он использует свои огромные зубищи при социальных взаимодействиях, так что вполне возможно, что те вовлечены и в секс).

И все же самое интересное в голом землекопе — его мозг. Судя по всему, кора головного мозга у этого вида полностью трансформировалась таким образом, что почти вся область, обычно предназначенная зрению, была преобразована в тактильную способность зубов. Подобное ремоделирование — прекрасный пример пластичности мозга млекопитающих, однако мало что известно о том, как это все работает. К счастью, можно тщательно изучить, как реконструируется структура мозга в контексте восприятия чувств на примере мышункула.

Обычный гомункул-мышь (мышункул) имеет типичную большую голову и сильно увеличенную в размерах морду, как у всех гомункулов млекопитающих, которые используют тактильные механизмы головы для интерпретации мира природы (рис. 3.1).

Грызуны, как правило, используют для этого вибриссы (усы): они постоянно шевелят ими, дотрагиваясь до предметов. Усы — это длинный сенсорный аппарат. В местах их крепления присутствуют нервные окончания. Информация, полученная рецепторами, передается в неокортекс мыши, концентрируется и «осмысливается» в баррелах соматосенсорной коры. Деннис О'Лири и его коллеги из Института биологических исследований Солка задались вопросом: как ремоделируются тактильные сенсоры мозга после того, как уменьшается сенсорная область, отвечающая за это чувство?

Они выяснили, что, когда область мозга, отвечающая за сбор тактильной информации, уменьшается в размерах, возможны два варианта развития событий. Первый: объединения баррелов, а следовательно, средства обработки информации из внешнего мира, могут стать просто миниатюрными. Второй: размер баррелов и их ориентация могут быть изменены в соответствии с другой структурной организацией мозга. Самый простой способ разобраться в этом вопросе — разведение мышей с некоторыми уменьшенными областями мозга, в частности с уменьшенной соматосенсорной корой. Существует мутировавшая разновидность мыши, так называемая узкоглазая мышь, и к подобной мутации привело именно уменьшение соматосенсорной коры. Причиной мутации стало повреждение белка PAX6, который считается основным геном-переключателем, определяющим развитие глаз (ген-переключатель — это ген, наличие которого необходимо, чтобы развитие шло по определенному пути). Другая функция белка PAX6 заключается в том, чтобы контролировать рост мозга посредством регуляции генов. К сожалению, узкоглазость у мышей несовместима с жизнью — те погибают еще на стадии эмбриона, и нельзя просто взять и развести их: узкоглазые мыши не доживут до того момента, когда смогут приносить пользу в эксперименте. О'Лири и его коллеги нашли способ локализовать экспрессию гена PAX6 с повреждениями в соматосенсорной коре, что само по себе уже невероятный трюк. И с помощью этих мутантов с локализованным геном они смогли получить карту мозга мышункула с уменьшенной соматосенсорной корой. Если взгля-

нуть на эту карту, становится очевидно, что ремоделирование мозга включает в себя не миниатюризацию нейронных связей, а скорее радикальную реконструкцию существующего плана. Добавьте к этому простому, но элегантному эксперименту описанный во вставке 3.1 еще более точный анализ, и вы придете к выводу, что траектория развития позвоночных животных стремится к совершенству общей нейронной сети мозга. И изменение этой траектории радикально повлияет на сенсорные способности позвоночных.

Подобные исследования проливают свет на то, как эмбриональное развитие влияет на границы сенсорного восприятия. Развитие мозга — очень важный фактор, определяющий, как мозг будет получать и обрабатывать информацию, поступающую из окружающей среды. Изучая это развитие, мы можем понять, где

3.1 | БАРЕЛЫ, БАРЕЛЕТТЫ И БАРЕЛОИДЫ

У мышункула каких-то баррелов нет, а какие-то — меньшего размера из-за измененного гена *РАХ6*. Мышункул мыши с мутированным геном очень сильно отличается от мышункула нормальной мыши. У мышей с поврежденным геном *РАХ6* также изменены и другие части мозга. К тому же в зоне поражения находятся и соматосенсорная кора (часть головного мозга, которая обрабатывает сенсорную информацию, полученную от других частей тела), задний мозг и таламус (часть лимбической системы). Оказывается, расположение участков нервной ткани и в заднем мозге, и в таламусе подобно расположению баррелов в соматосенсорной коре. Эти участки даже названы аналогично: в заднем мозге — баррелетты, а в таламусе — баррелоиды. То, как развиваются баррелы, влияет на развитие баррелеттов и баррелоидов, а следовательно, и на развитие таламуса и заднего мозга. Это означает, что на уровне развития возникает иерархия сигналов, которые тонко настраивают высшую нейронную структуру мозга. Изменение генов в иерархии или того, как эти гены проявляются, может оказать огромное влияние на сенсорные способности млекопитающих.

именно в мозге обрабатываются определенные данные. А биология развития способна нам рассказать, как устроены органы, которые воспринимают раздражители внешнего мира.

Мы не видим собственного носа. Вот сами попробуйте. Двумя открытыми глазами можно узреть лишь часть своего шнобеля, да и то смутно. А если закрыть один глаз, картинка становится немного лучше. Кстати, гораздо четче мы видим кончик носа. В отличие от лошадей, которые не могут похвастаться таким умением: конец морды у них находится в явно выраженном слепом пятне. Однако у нашего зрения тоже есть слепые пятна. Например, посмотрите на точку и букву X чуть ниже в этой книге. Теперь закройте левый глаз и приблизьте лицо к странице так, чтобы вы видели и точку, и X. Сфокусируйте взгляд на точке слева и медленно отодвигайте страницу от лица. На каком-то расстоянии X справа должна исчезнуть из поля вашего зрения. Для меня это примерно 30 см. Вот это и есть классическое определение слепого пятна.

•

X

У других позвоночных тоже есть подобные слепые пятна, но наше крошечное пятнышко не идет ни в какое сравнение со слепой зоной, находящейся у нас за головой. Это огромное слепое пятно служит нам, людям, напоминанием, что наши зрительные качества и близко не стоят со способностями других организмов на планете. Как вид мы обладаем четко определенной, но узкой способностью воспринимать внешний мир. Например, хотя мы и считаемся видом, который сильно полагается на зрение при сборе необходимой информации, наш диапазон визуального восприятия довольно узок по сравнению с другими организмами, которые чувствуют световые волны. Поле зрения определяет часть пространства, которую видит индивид, держа голову неподвижно. В основном оно зависит от расположения глаз на голове и от того, как глазные яблоки могут двигаться в глазницах. Поле зрения охватывает два направления: вправо/влево и вверх/вниз. Есть и дополнительный параметр поля зрения: в какой мере общее

поле является бинокулярным, или стереоскопическим. Стереоскопическое зрение означает, что вы видите пространство двумя глазами и воспринимаете его объемно. У людей поле зрения ничтожно — это всего каких-то 180 градусов, и лишь примерно половину всего мы видим в стерео, то есть бинокулярным зрением.

Расположение глаз определяет, насколько поле зрения одного глаза перекрывается полем зрения другого. То есть, приобретая периферическое зрение, организм лишается какой-то доли бинокулярного. Возьмем, к примеру, голубя. Его поле зрения включает почти 360° , но лишь часть пространства (скажем, 30°) он видит стереоскопическим зрением. У собак тоже довольно широкий охват — почти в два раза больше, чем у человека, однако у них, как и у голубя, бинокулярное зрение ничтожно и составляет примерно половину нашего. Должно быть очевидно, что эволюция так или иначе скорректировала почти все вариации поля зрения животных.

Что управляет этими удивительными характеристиками поля зрения животных? Безусловно, в какой-то степени это естественный отбор. Например, у макак поле зрения очень ограничено и составляет чуть больше 180° , а их бинокулярное зрение охватывает лишь половину от этого. И в итоге они хоть и имеют не слишком широкий обзор, но видят отличную картинку в трехмерном изображении. Но зачем приматам объемное зрение? Чтобы ответить на этот вопрос, надо вспомнить, где жили их предки. Разумеется, большую часть своей жизни они проводили на деревьях, проворно прыгая с ветку на ветку. Попробуйте сделать следующее (только попросите кого-то вас подстраховать): закройте один глаз и попытайтесь залезть на дерево (или лестницу). Вам будет сложно решить, куда именно лучше поместить руку перед тем, как сделать следующее движение. Если вы почувствуете, что падаете, пожалуйста, откройте оба глаза и откорректируйте ваши действия. Это упражнение показывает, что стереоскопическое видение дает нам глубинное восприятие пространства и облегчает интерпретацию физических структур, с которыми мы сталкиваемся. Другие животные с острым стереоскопическим зре-

нием — это тоже в основном те, кому для охоты или, наоборот, для выживания приходится ориентироваться в трехмерном пространстве, полагаясь на четкое восприятие глубины. А вот голуби и другие организмы, которые в процессе эволюции научились ориентироваться в этом страшном и смертельно опасном мире, полном хищников, не нуждаются в стереоскопическом зрении, им достаточно знать, что кто-то подкрадывается или устремляется к ним. Так что естественный отбор играет огромную роль в этом явлении. Но это еще не конец истории.

Давайте взглянем на осьминога (моллюска): у него феноменальный охват поля зрения в 360° и при этом нет слепых пятен. Почему же? Ответ очевиден, если понять, как эволюционировали глаза и у человека, и у осьминога. Примерно двадцать пять раз в истории жизни животных на этой планете независимо друг от друга появлялись глаза. Это значит, что за более чем полмиллиарда лет с момента зарождения жизни на Земле произошло двадцать пять независимых случаев появления органов, чувствительных к свету. Следовательно, глаза позвоночных и осьминогов развивались по-разному.

Светочувствительная часть человеческого глаза, называемая сетчаткой, состоит из группы клеток (у позвоночных это палочки и колбочки) и соединена с мозгом посредством нервного пучка. У позвоночных этот пучок проходит перед сетчаткой, и хотя он совсем крошечный, но все же закрывает часть поля зрения, тем самым создавая слепое пятно. А вот у осьминогов глаз развивался так, что нервы, ведущие к мозгу, присоединялись с задней стороны сетчатки и не заслоняли ту от падающего света. Поэтому у осьминогов и нет слепых зон. У млекопитающих не было ни единого шанса избавиться от своих слепых зон во время эволюции. А вот моллюскам выпала другая участь, и все из-за того, как формировались их глаза. В сущности, динамика процесса развития глаз позвоночных и глаз осьминога и определяет наличие слепого пятна. Естественный отбор, вероятно, имеет весьма отдаленное отношение к отсутствию слепого пятна у осьминога, хотя теперь это преимущество тому очень пригодилось.

Такие сценарии, как отсутствие слепого пятна у осьминога, при рассмотрении вопросов адаптации в природе напоминают нам о трех аспектах эволюции. Первый касается того, что Ричард Левонтин и Стивен Джей назвали антревольтом, вдохновившись архитектурным шедевром — собором Святого Марка в Венеции. После того как собор построили, художники расписали внутреннюю поверхность внушающих благоговейный ужас куполов сценами из Библии. Изображения идеально вписаны в пазухи сводов, те самые антревольты: на одной из них, к примеру, нарисован человек, льющий воду из большого кувшина в сужающееся пространство под своими ногами. Глядя на расписанные поверхности собора, легко вообразить, что надсводчатые строения специально были созданы для того, чтобы демонстрировать картины. Неплохая гипотеза, но неправильная. Антревольты — это несущие конструкции, поддерживающие огромные купола собора, а фрески на них, несмотря на идеальное заполнение пространства, лишь красивое дополнение. Вот и отсутствие слепого пятна у осьминога всего-навсего побочный эффект, который хоть и служит теперь адаптивным ответом, но проявился благодаря «архитектурной» структуре нервных соединений глаза.

Второй аспект эволюции заставляет нас вспомнить, что мы не должны интерпретировать все, что мы видим в мире природы, как адаптацию, ведь это совсем не так. Фактически иногда решение одной проблемы — это компромисс для решения другой. Пример такого компромисса — глаза членистоногих.

Членистоногие — большая группа животных, включающая и насекомых. Они обладают сложными, или фасеточными, глазами, имеющими древнюю структуру, о чем свидетельствуют ископаемые остатки трилобитов¹ с прекрасно сохранившимися фасеточными глазами, возраст которых составляет сотни миллионов лет. Антони ван Левенгук, известный своими наблюдениями за зубным

¹ Трилобиты — вымерший класс морских членистоногих, имевший большое значение для фауны палеозойских образований земного шара. Они обитали в древних океанах больше 250 000 000 лет назад.

налетом и подвижностью сперматозоидов через свой знаменитый микроскоп, был первым, кто описал удивительную структуру сложных глаз насекомых. Его маленький микроскоп представлял собой ручное устройство с линзой, в котором для подсветки использовалась свеча, установленная за объектом наблюдения. Когда Левенгук поместил роговицу глаза насекомого под микроскоп, он был ошеломлен увиденным. Понемногу меняя положение свечи, ученый нашел такой угол по отношению к образцу, что заметил «перевернутые изображения пламени: и не одно изображение, а несколько сотен. Они были ужасно маленькие, и я видел, что все они двигались». Он увидел свет свечи, проходящий через сотни крошечных фасетов, называемых омматидиями, которые и составляют сложный глаз насекомого. Примечательно, что каждый омматидий сложного глаза связан с мозгом насекомого. Кроме того, чем больше омматидиев, тем больше линз и тем меньше их размер. В итоге дифракция света становится проблемой: появляется размытый фокус или падает острота зрения.

Количество омматидиев может варьироваться. У насекомых с крошечными глазками их меньше: например, у рабочих муравьев, которые в основном полагаются на запах, всего шесть омматидиев. А вот насекомые, которые ориентируются при охоте на движение объекта, такие как стрекозы, имеют более двадцати пяти тысяч омматидиев. Фасеточные глаза очень хорошо улавливают движение: они могут воспринимать примерно двести кадров в секунду (предел человеческого глаза — тридцать кадров в секунду, при большей скорости картинка размывается). Компромисс в данном случае очевиден: сложные глаза с множеством фасетов способны различить мельчайшие движения, но при этом острота зрения снижается. По всей видимости, определенное количество омматидиев у каждого вида выработалось в зависимости от того, что именно нужно насекомому — острота зрения или способность распознавания движения. В этом и заключается компромисс: развитие одной функции компенсирует отсутствие другой.

И третья причуда эволюции выражается в том, как развиваются организмы. В ряде случаев путь, по которому идет развитие,

ограничивает то, каким образом в итоге формируются морфологии. Из-за этих ограничений некоторые морфологии, даже если их можно считать оптимальными, просто не эволюционируют. Расположение глаз на нашем лице обусловлено тем, как развивались глаза у позвоночных. Более чем вероятно, что оно связано с эволюцией ширины поля зрения у позвоночных организмов. Генетический код управления развитием глаза ответственен за ограничение места расположения глаз и за процесс их формирования во время эмбрионального развития.

На заре генетики было принято считать, что один ген соотносится с одним ферментом. Джордж Бидл, Эдуард Тейтем и Джошуа Ледерберг даже получили Нобелевскую премию в 1958 году за эту занимательную теорию, которая хоть и звучит правдоподобно для простых одноклеточных, таких как бактерии, но не работает в случае более сложных организмов. Современную трактовку подлинного характера того, как гены управляют сложными фенотипами, изложил Аллан Вильсон в 1970-х годах в Калифорнийском университете в Беркли. Вместе с коллегами в своей лаборатории Вильсон обнаружил, что, хотя морфология и поведение людей и шимпанзе сильно отличаются, их белковые составы схожи. Ученые пришли к выводу, что огромные морфологические и поведенческие различия между организмами не были результатом простых изменений в структуре белков. И выдвинули гипотезу о том, что, напротив, для создания фенотипических модификаций в эволюции изменения в регуляции генов были гораздо важнее, чем простые точечные мутации. Давайте рассмотрим, например, размещение глаз на лицах организмов и, следовательно, управление полем зрения у позвоночных.

Влияние генной регуляции на структуру организма позвоночных стало одним из наиболее важных открытий в биологии за несколько последних десятилетий. И в некотором смысле это явление также связано с восприятием, поскольку клетки в развивающемся черепе должны распознавать, где они находятся относительно развивающегося поля других клеток. Восприятие осуществляется почти так же, как у одноклеточных организмов при контактах с внешним ми-

ром: молекулы подают клетке сигналы и дают ей понять, где именно она находится, а это «понимание», в свою очередь, говорит клетке, что она должна сделать. Подобная передача сигналов похожа на сильно усложненную версию чувства кворума. Сигнальные молекулы работают, связываясь с другими молекулами в клетке. Для тех сигнальных систем, что требуют точного развития структур в организме позвоночных, количество присутствующих рядом с клеткой сигнальных молекул и будет определять то, что клетка делает. Это происходит из того, что сигнальные молекулы работают за счет градиентной диффузии. Как правило, гены в клетках имеют разные концентрации специфических сигнальных молекул, которые надо включить или отрегулировать, чтобы началось производство белков. Если есть изменение в концентрации, которая заставляет ген выкачиваться из продукта реакции, то градиент сигнальной молекулы вызовет различные результаты на одном конце градиента (скажем, на конце с низкой концентрацией) по сравнению с другим концом градиента (конец с высокой концентрацией).

Этот сценарий в основном и определяет местоположение глаз на голове у позвоночных. Сигнальная молекула, о которой идет речь, была впервые обнаружена у *Drosophila melanogaster* (плодовой мушки дрозофилы), а уже впоследствии и в геномах позвоночных животных. Гены, продуцирующие белки и взаимодействующие с этой сигнальной молекулой, названы в честь ежа. Из эмбрионов ежей-мутантов, имеющих какие-то отклонения, рождаются неказистые, маленькие, волосатые существа, умирающие еще на ранней стадии развития. В вакханалии глупых названий генов (а биологи, изучающие дрозофил, пожалуй, превзошли в этом всех) поучаствовала и одна из важных сигнальных молекул, окрещенная Sonic Hedgehog (Shh) в честь мультяшного персонажа видеоигры. Другим генам тоже дали «ежиные» имена: индийский еж, пустынный еж и даже еж ухти-тухти (Беатрис Поттер)¹. Но здесь мы рассмотрим только Shh. Чтобы объяснить сложную

¹ Беатрис Поттер (Элен Беатрикс Поттер, 1866–1943) — английская детская писательница и художница. Речь идет о сказке «Ухти-тухти».

3.2 | КАК ДЕЛАТЬ ЦИКЛОПОВ

Сигнальная молекула Sonic Hedgehog (Shh) создает градиент в эмбрионе позвоночных, который контролирует ряд генов, определяющих тип клеток в развивающемся мозге и черепе. На рисунке показан градиент на самой выступающей части лица. Светло-сероватые полосы на диаграммах показывают, где Shh экспрессируется. На крайнем левом изображении этот сигнальный белок включен на полную мощность у нормально развивающегося эмбриона. Он сигнализирует о производстве всех белков, и все они производятся (белый, светло-серый, темно-серый и черный), тогда место для нормального развития глаз образуется где и следует — выше черного белка. Ближайший к Shh серый белок для экспрессии нуждается в наибольшем количестве Shh, а белку других оттенков серого, а также белому и черному белкам необходимы промежуточные количества Shh. На втором изображении часть Shh убрана. Когда это происходит, светло-серый белок, ближайший к белку Shh, не экспрессируется, как показано на третьей панели. По мере того как Shh уменьшается, белые, светло-серые и черные гены не получают достаточного количества Shh для включения, и поэтому их активность снижается, как показано на четвертом изображении. Пятое изображение демонстрирует результат, когда весь градиент Shh удален, а на шестом мы видим, что поле, где располагается глаз, переместилось в самую нижнюю часть развивающегося мозга и один глаз перекрывает другой, создавая существо, похожее на циклопа.

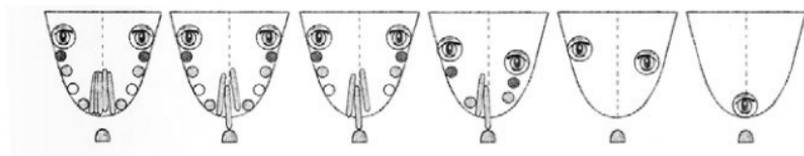


Рис. 3.2. Вот как Томас Джессел объясняет расположение глаз на лице при помощи градиента сигнального механизма Hedgehog. По-разному закрасненные точки представляют четыре белка, которые необходимы для нормального размещения глаз на лице. Серые полосы в нижней части развивающегося мозга представляют собой количество выраженных генов Shh, контролирующих выработку четырех белков. Место, где на рисунке изображены глаза, представляет их конечное положение после развития

цепочку событий, я использую элегантный способ Томаса Джесела, представленный во вставке 3.2 и на рисунке 3.2.

Феномен циклопа действительно наблюдается в природе. Крупный рогатый скот и овцы, питающиеся чемерицей (растением рода *Veratrum*), поглощают большое количество алкалоидов, содержащихся в ней. Как выяснилось, эти алкалоиды блокируют выработку белка в сигнальном пути Hedgehog, создавая ситуацию, показанную на крайнем правом рисунке. Циклопы, появляющиеся среди этих животных из-за снижения производства белка Shh, поразительны, и этот природный феномен помогает нам воочию убедиться в том, как могло бы развиваться расположение глаз у позвоночных. Много генов участвует в формировании нервной системы в голове и глазах, таким образом влияя на расположение глаз. А настройка сигналов, с которыми эти гены взаимодействуют, представляют собой логичный и продуктивный способ осмыслить, как природа может изменить поле зрения. Человеческое развитие остановилось на конкретном поле зрения, тесно связанном с эволюцией нервной системы и глаз, и в итоге мы имеем то, что имеем, — относительно ничтожное поле зрения. Приходится признать: наше поле зрения по сравнению с другими животными, прямо скажем, так себе, но по крайней мере мы знаем почему.

ДЕЛО ВКУСА (И ЗАПАХА)

Восприятие вкуса и запаха у животных

В стране скунсов правит тот, у кого
заложен нос.

КРИС ФАРЛИ, комик

Большинство животных в процессе развития стали весьма разборчивы в еде. Например, если мы чувствуем запах или вкус чего-то дрянного, мы не будем это есть. Скорее всего, этот ответ развился как средство быстрой классификации встреченного объекта, о чем я говорил в главе 2, и подпадает под категорию «пища» — «я ем его». Вероятно, все чувства даны нам, чтобы мы могли сделать выбор: это можно есть, а это — нет. И наша способность принимать такого рода решения зародилась глубоко в прошлом. Не забывайте, что мозг позвоночных имеет три уровня организации. Самый глубокий, самый примитивный уровень унаследован нами от ранних позвоночных и содержит ствол и мозжечок. Следующий уровень, состоящий в основном из лимбической системы, усложняет интерпретацию такой информации, как запах и вкус. Последний уровень, кора головного мозга, добавляет еще более изощренный способ восприятия данных, полученных от органов чувств.

То, как вкус интерпретируется этим многослойным мозгом, прекрасно иллюстрирует, как именно интегрированы все три слоя. Вкус взаимодействует с нашей системой вознаграждения, или системой внутреннего подкрепления, посредством кортико-

базальной гангlio-таламо-кортикальной замкнутой системы, или петли, как называют ее нейроанатомы. Эта петля представляет собой набор путей в нервных тканях, которые пересекают главные отделы мозга, и работает она по круговой схеме: кора — базальные ядра — таламус. Наиболее значимые системы вознаграждения у позвоночных — это нейроны, проводящие гамма-аминомасляную кислоту (ГАМК) и дофамин. ГАМК и дофамин — две небольшие молекулы, которые проникают в мозг и взаимодействуют со встроенными в мембраны нейронов рецепторами, запуская потенциал действия. Дофаминовые нейроны, в частности, играют огромную роль в эволюции использования животными системы вознаграждения.

Удовольствие играет огромную роль в обучении организмов повторять то, что для них выгодно. Ведь если что-то приносит пользу и доставляет удовольствие, то организм снова и снова будет искать то, что вызвало эту реакцию: секс, что-то вкусное или, что приводит к ужасным долгосрочным последствиям, наркотик. Когда мы пробуем испорченный продукт, уровень дофамина в мозгу резко падает и желание есть нечто подобное тут же пропадает. А вот если в рот попадает лакомый кусочек, сладкий, вкусный или питательный, уровень дофамина возрастает, и система вознаграждений тут же откликается: «Хочу еще». Дофамин посылает нам сигнал съесть как можно больше, но действие его временно, и в какой-то момент мы чувствуем насыщение и перестаем заглатывать кусок за куском. Наркотики захватывают мозг именно по такой схеме. Вместо кратковременного всплеска дофамина концентрация в молекуле закрепляется на постоянном высоком уровне, что вызывает тягу ко все большему и большему количеству наркотика и в итоге приводит к пагубной зависимости.

Запуск этой системы очень похож на обработку вкуса: все начинается с небольшого количества химического вещества или молекул, воздействующих на хеморецепторы. Вкус возникает из комбинации молекул, которые мы глотаем с пищей, с воздухом или напитками и обрабатываем вкусовыми рецепторами во

рту. Затем информация с рецепторов передается в мозг, где интерпретируется. Вкус, различаемый рецепторами, бывает пяти основных видов: горький, сладкий, кислый, соленый и умами. Кроме того, учитывается жирность и содержание углеводов. Вкусовые рецепторы находятся преимущественно на языке, но есть они и в других местах, например в тканях дыхательных путей и в тонком кишечнике.

Исследователи описали несколько видов вкусовых рецепторов, которые влияют на восприятие сладкого, горького и вкуса умами, и назвали их рецепторами TAS (по первым трем буквам английского слова *taste* — вкус). Принцип действия TAS очень похож на работу обонятельных рецепторов, воспринимающих запахи. Рецепторы TAS1 воспринимают сладкий вкус и умами, а TAS2 — горький вкус. Также выделены рецепторы для определения соленого и кислого вкусов, но о них известно меньше. Главный кандидат на роль рецептора для определения соленого — это ген, который, как ни странно, задействован и в развитии поликистоза почек (PKD) и называется PKD2L1 (2L1 указывает тип гена PKD). Этот рецептор — ионный канал, который также участвует в распознавании кислот. Рецепторы типа ионных каналов — это белки, находящиеся в мембране нервной клетки и отвечающие за прохождение определенных видов ионов через клеточную мембрану. Формируя потенциал действия, эти ионные каналы запускают вкусовую реакцию, которая возникает, когда ионы проходят через мембрану. Другими рецепторными молекулами для определения кислого и соленого являются рецепторы натриевых каналов (SC), называемые SCNN, три из которых (SCNN1a, SCNN1b и SCNN1g) считаются основными переносчиками информации о соли и кислой среде. Разумеется, рецепторов для определения кислого и соленого может быть и больше. Как и в случае с обонятельными рецепторами, количество генов для этих сигнальных молекул, обнаруженных в геномах животных, представляет собой любопытный феномен. Человек обладает примерно семьюдесятью генами-идентификаторами сладкого, горького и умами (TAS1 и TAS2), и несколько его генов относят-

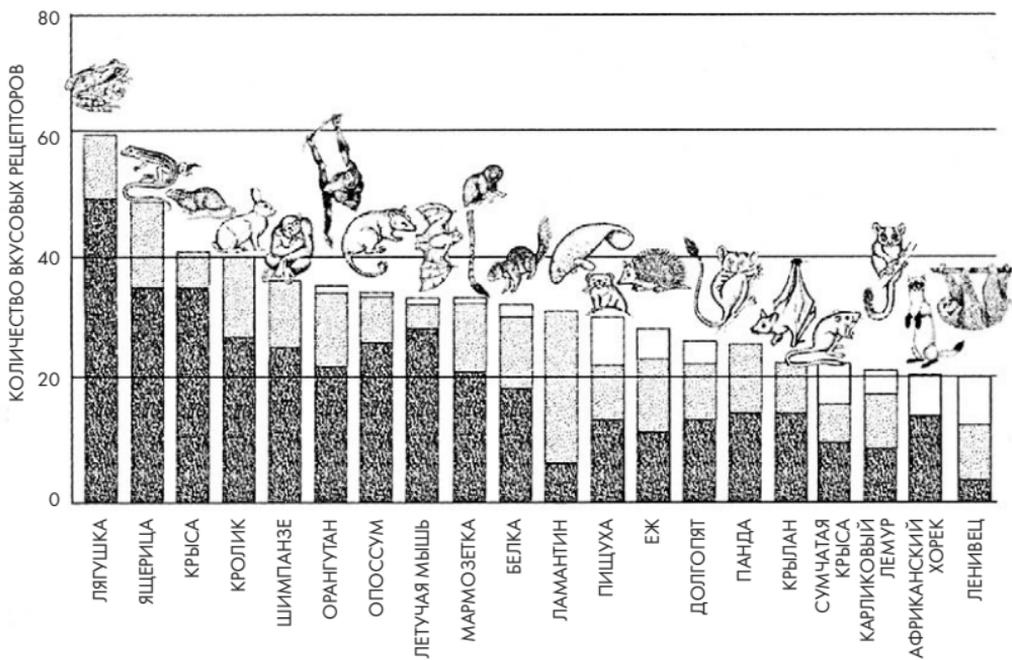
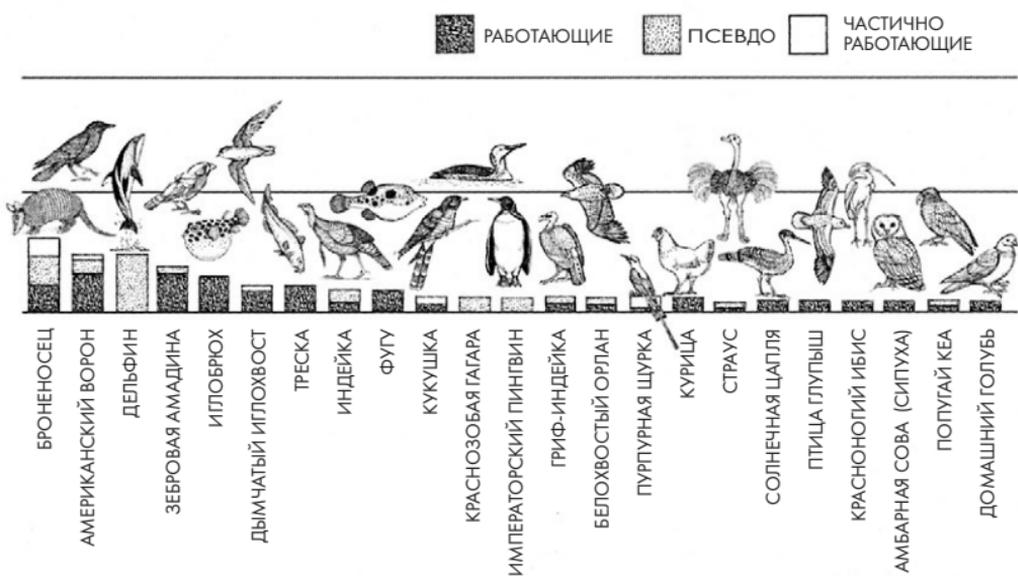


Рис. 4.1. Гистограмма показывает количество действующих, псевдо- и укороченных вкусовых рецепторов у разных позвоночных

ся к кислой и соленой категориям. А вот животный мир гораздо разнообразнее в том, что касается вкуса (рис. 4.1).

По всей видимости, животные не так уж разборчивы в еде, чтобы делить вкусы на целых пять категорий, им хватает и трех: «Ням-ням!» («Мне нравится»), «Фу!» («Мне не нравится») и «Так себе» («Мне все равно»). Если вы любите кошек, предложите вашим мохнатым друзьям сладкое. Попробуйте и убедитесь, что им плевать на конфеты. Такое равнодушие — это не проявление крутых кошачьих манер, а следствие того факта, что кошки не могут оценить подобное лакомство. Способность ощущать сладкое проявляется благодаря двум из семидесяти (или около того) рецепторов TAS, называемых TAS1R2 и TAS1R3. У животных, которые могут различить сладкий вкус (включая людей), эти два рецептора образуют димер. Когда нам в рот попадает что-то сладкое, сахаросодержащие соединения связываются с димерным белком и отправляют сигнал, идущий непосредственно в мозг по круговой схеме: кора — базальные ядра — таламус. В мозге этот сиг-



нал интерпретируется как «Мне нравится», поскольку в сладких продуктах содержится много важных для жизни углеводов. У кошек в гене *TAS1R2* есть длинная делеция, которая сводит на нет функцию рецепторного белка, заставляя его классифицироваться как псевдоген (ген, который присутствует в геноме, но не вырабатывает правильный белок). Это простое изменение генома лишает кошек шанса насладиться чем-нибудь сладеньким, хотя некоторые исследователи считают, что большие дозы сахара те могут почувствовать. Утрата длинного участка гена *TAS1R2* произошла у общего предка кошек, и это означает, что все большие кошки, такие как львы и тигры, наряду с домашними тоже не могут ощущать сладкий вкус. А вот псовые — ближайшие родственники кошачьих в отряде хищных — способны на это. Даже у панды, этого харизматичного медведя, любящего бамбук, не повреждены гены рецепторов, распознающих сладкое. Панды чувствуют сладкий вкус, и, если им предложить на выбор сладкую воду и обычную, они предпочтут ту, что повкуснее. Вероятно, именно поэтому мы стараемся спрятать рюкзаки со сладкими батончиками гранолы куда-нибудь вне досягаемости любого медведя, когда путешествуем по местам, где живут эти плотоядные сладкоежки.

Размышляя об умении плотоядных животных распознавать сладкий вкус, невольно задаешься вопросом: потеря способности различать сладкое у кошачьих является причиной или следствием их пристрастия к мясу? Трудно определить, как происходит потеря функции рецептора TAS1R2 (также называемая псевдогенизацией), но этот феномен действительно напоминает нам: вывод о том, что потеря функции гена адаптивна именно для употребления мяса, ошибочен. Может быть, так оно и есть, но столь же вероятно, что область гена TAS1R2 утратилась из-за случайного события в геноме общего предка кошек, а затем это было использовано, чтобы усилить плотоядные характеристики кошачьих. Подобный альтернативный сценарий — хороший пример того, что Стивен Джей Гулд и Элизабет Врба назвали экзапацией. Этот признак развивается по какой-то довольно обычной причине, а позже исчезает или поглощается более заметными системами признаков (в данном случае это предпочтение кошачьих к мясной диете).

Если и запах, и вкус являются хемосенсорными, тогда как различаются восприятия запаха и вкуса? Разницу очень хорошо видно на примере насекомых. Помимо того что у насекомых за распознавание запаха и вкуса отвечают разные рецепторы, всегда можно найти отличия, следуя простой логике: обоняние реализуется через обнаружение газообразных молекул, и обычно эти рецепторы располагаются на усиках; вкус же ощущается при прямом телесном контакте с объектом. Итак, какие части тела насекомых участвуют в дегустации? У насекомых, таких как мухи, есть рты... почти рты. У них есть ротовой аппарат, и это очень корректное обозначение подобного уродства. Рты злобных пришельцев-охотников в фильме «Хищник» сделаны по образу и подобию ротового аппарата насекомых, и нельзя назвать их милыми. В ротовом аппарате мухи есть вкусовые рецепторы, называемые GRN (где N означает вариант), их примерно семьдесят, и они не имеют никакого отношения к вкусовым рецепторам, обнаруженным у позвоночных. Однако известно, что мухи могут различать горькое и сладкое, а также воду и углекислоту. И неудивительно, что

вкусовые рецепторы мух и других насекомых встроены именно в те уродливые ротовые аппараты — именно они постоянно контактируют с пищей. Пожалуй, вполне объяснимо и то, что GRN размещаются на крыльях и ногах и даже на яйцекладущем аппарате самок — ведь насекомые используют все эти органы, чтобы чувствовать питательные вещества на поверхностях, которых те касаются.

Диапазон количества вкусовых рецепторов GRN в геномах насекомых впечатляет: от восьми у вшей (*Pediculus*) до более чем двухсот у малого мучного хрущака (*Tribolium*). Количество генов обонятельных рецепторов в геномах насекомых положительно, хотя и в малой степени, коррелирует с генами вкусовых — «богатые становятся богаче» и в отношении рецепторов, и в отношении точности этих двух чувств. Насекомые, добывающие пищу из одного или нескольких источников, должны иметь меньше генов вкусовых рецепторов: им нужно точно знать, едят ли они то, что следует. А насекомые, которые могут забыть про диету и позволить себе разные гастрономические безрассудства (также известные как многоядные насекомые, или полифаги), более взыскательны в отношении вкуса. И действительно, геномы некоторых из них содержат пару сотен генов вкусовых рецепторов. Но в целом корреляция довольно мала, и требуется гораздо больше исследований о том, как насекомые различают вкус и как это связано с эволюцией их рациона.

Диапазон генов вкусовых рецепторов у позвоночных так же широк, как и у насекомых. Интереснее всего, пожалуй, рассмотреть у них рецепторы, распознающие горький вкус, именно они особенно показательны для категории «я это ем». Горький вкус, вероятно, наиболее важен для понимания того, чего нужно избегать. Сладкие продукты — довольно легкий выбор: организму наверняка понравятся содержащиеся в них углеводы. А вот с горькой пищей нужно быть более избирательным — нельзя же просто игнорировать все горькое. Это и есть причина широкого спектра вариаций рецепторов горького вкуса (TAS2s) у позвоночных животных. Поскольку травоядные получают не так много питатель-

ных веществ из своего рациона (растения в целом менее богаты калориями и другими питательными компонентами, чем мясо), они не могут позволить себе отказаться от потенциально питательных ценных растений. Диян Ли и Цзяньчжи Чжан утверждают, что травоядные должны быть более придирчивы к растениям, с которыми они сталкиваются. Улучшенная система определения разных видов горечи помогает им не отвергать все подряд, но в то же время избегать действительно отвратительных на вкус продуктов (см. вставку 4.1).

У кошек довольно много укороченных генов, отвечающих за горький вкус, и много псевдогенов, но они все еще сохраняют способность чувствовать горечь. Этот метод подсчета генов привел к удивительному открытию: у морских млекопитающих (осо-

4.1 | ВКУСОВЫЕ РЕЦЕПТОРЫ

У позвоночных животных широкий спектр вкусовых рецепторов. Рецепторы, реагирующие на горький вкус, как и обонятельные рецепторы, включают в себя некоторое количество псевдогенов и укороченных генов. Оказывается, что в геномах некоторых позвоночных значительная часть генов — это либо псевдогены, либо укороченные версии генов. Количество рецепторов сильно колеблется: у некоторых птиц их три, у морских свинок — до семидесяти (только половина из которых функциональна), у шпорцевых лягушек — около шестидесяти (из которых более пятидесяти функциональных). Проанализировав рацион различных позвоночных и изучив их вкусовые рецепторы, Диян Ли и Цзяньчжи Чжан смогли предположить, что количество генов рецепторов горького вкуса влияет на рацион (или наоборот). Ученые сделали вывод, что у травоядных больше рецепторов TAS2, чем у всеядных и плотоядных, но при этом предупредили, что взаимодействия вкусовых рецепторов с экологией организмов довольно сложны. Похоже, что у позвоночных вкус играет главную роль в идентификации: пригодно нечто для питания или нет.

бенно у дельфинов — см. вставку 4.1) нет функциональных генов, отвечающих за горький вкус. Судя по всему, все китообразные массово утратили гены рецепторов горького и сладкого вкусов — именно к такому выводу пришли Пин Фэн и его коллеги, исследовавшие на этот предмет двенадцать видов китов. Потеря этих рецепторных генов означает, что китообразные лишились способности распознавать четыре из пяти основных вкусов — сладкий, умами, кислый и горький. Они все еще могут различать соленый вкус, что предполагает эволюционный механизм развития вкуса этих морских млекопитающих. Однако Фэн и его коллеги утверждают, что китообразные на самом деле не умеют различать вкусы и даже не нуждаются в этой способности. Высокая концентрация соли в морской среде подавляет большинство вкусов, и многие виды китов глотают добычу целиком, совсем не пробуя свою пищу, поэтому остальные четыре вкуса были просто утрачены за ненадобностью. Морская среда неблагоприятна для сохранения генов горького вкуса TAS2. Ламантин оказался единственным млекопитающим в данном исследовании, отличающимся от остальных: он живет в морской среде, у него 75% горьких вкусовых генов, и все они псевдогенные, то есть неактивные. Но, несмотря на небольшое количество генов TAS2 и вкусовых рецепторов во рту, ламантин все же может чувствовать вкус пищи. Возможно, что этому поспособствовали его растительная диета и тот факт, что он действительно жует еду, — именно перечисленное и не позволило бесследно исчезнуть всей генной семье.

Структура генов вкусовых рецепторов птиц тоже весьма интересна (рис. 4.1). У всех птиц очень мало генов рецепторов TAS2: больше всего у американских воронов и зябликов — семь работающих генов рецепторов горького, а вот у пингвинов их нет совсем. Существует и экологическая корреляция рациона с количеством генов рецепторов TAS2. Используя похожую аргументацию, Ли и Чжан, Кай Ван и Хуабинь Чжао утверждают, что у растительноядных (и некоторых насекомоядных) птиц, как правило, больше генов рецептора TAS2. Пингвины — это другая история, поскольку они тоже были изучены на предмет утраты

генов вкусовых рецепторов четырех вкусов, и результаты этого исследования показывают, что пингвины потеряли способность чувствовать сладкий, горький и умами, но при этом сохранили рецепторы, предположительно воспринимающие кислый и соленый вкус. Другие птицы, по-видимому, сохранили почти все эти вкусовые рецепторы: лишь некоторые виды потеряли рецепторы, различающие сладкий вкус. У пингвинов, в отличие от других птиц, нет вкусовых рецепторов на языке, и они проглатывают пищу целиком, избегая необходимости распознавать вкус, отличный от соленого. Стоит отметить, что только появившаяся способность секвенировать полные геномы микробов, животных и растений позволяет делать такие выводы. И в перспективе, по мере секвенирования геномов все большего числа организмов, будет реализовано объединение экологии питания с генетическими и молекулярными аспектами вкуса.

Любой, кто был в Нью-Йорке в середине июля, может подтвердить, что наши органы обоняния довольно хорошо улавливают неприятные запахи. В разгар лета запах там столь ужасен, что это даже побудило автора одной книги назвать город Фу-Йорком¹. А вот дрозофила обыкновенная рада кучам мусора, источающим сильный смрад в Фу-Йорке. Уже больше ста лет эта мушка выступает в роли рабочей лошадки биологии: все кому не лень использовали ее и в хвост и в гриву, чтобы понять механизмы обоняния. В начале XX века Чарльз Вудворт впервые предположил, что это крошечное насекомое, известное также как фруктовая мушка, могло бы стать отличным объектом для экспериментов. Дрозофила — идеальная подопытная: быстро размножается (каждые десять дней) и легко разводится в лабораторных условиях (немного бананового и яблочного соуса, смешанных с овсянкой и уксусом, — и дело в шляпе). Томас Хант Морган выбрал мушку

¹ Речь идет о детской книге-путеводителе *New York, Phew York-A Scratch N Sniff Adventure* Эмбера Джонса, консьержа одного из нью-йоркских отелей. Когда его спрашивали, как дойти до какого-то места, он отвечал: «Идите на запах», а после «собрал» все запахи и написал книгу.

для своих экспериментов еще в начале 1900-х годов, и она быстро оправдала возложенное на нее доверие: у крошки обнаружилось несколько очень заметных спонтанных мутаций (среди прочих — белые глаза и загнутые кверху крылья), и генетик смог использовать их для разработки законов скрещивания генов в хромосомах. А еще фруктовая мушка сыграла удивительную роль в понимании механики обоняния. В 1907 году Уильям Мортон Берроуз предположил, что именно запах регулирует поведение дрозофилы. Он писал: «Тот факт, что подгнившие фрукты, которыми они питаются, постоянно генерируют спирты и другие родственные соединения, заставил меня подозревать, что именно эти вещества и привлекают мушек».

Чтобы окончательно подтвердить, что мушки реагируют на химические запахи, Берроуз провел гениальные эксперименты. Только пятьдесят лет спустя появились более совершенные методы для получения мутантов дрозофилы с развитыми обонятельными органами. Было изобретено несколько оригинальных устройств для проверки в лабораторных условиях обонятельной способности мутировавшей мушки. Наиболее часто используют так называемую Y-образную трубку, где Y развернут вертикально. Из трубки откачивают воздух, чтобы устранить посторонние запахи. В конец одной из наклонных частей Y помещают источник исследуемого запаха, а другую часть — контрольную — оставляют без запаха. Мухи будут рефлекторно и целенаправленно подниматься вверх по трубке (технический термин подобного явления — отрицательный геотаксис¹) до места соединения двух наклонных частей Y. А вот там им уже придется принимать решение на основе собственных обонятельных предпочтений: нравится запах — двигайся в одну сторону, не нравится — в другую, а быть может, он абсолютно невыносим? Были разработаны очень точные методы подсчета и интерпретации данных, и они помогают выявить мутировавших мушек, которые либо теряют, либо приобретают способность обнаруживать специфические запахи (см. вставку 4.2).

¹ Отрицательная реакция на земное притяжение. — *Прим. ред.*

4.2 | КАК НАЙТИ МУШЕК

С ИЗМЕНЕННЫМИ ОРГАНАМИ ОБОНЯНИЯ

Чтобы определить, есть ли у мушки мутация органов обоняния, используется очень простой критерий. Он основан на соотношении мушек, чувствительных к запахам, и контрольной группы, не различающей запахи. Как я уже говорил в основном тексте при описании эксперимента с Y-образной трубкой, мушкам дают возможность реагировать на определенный запах, а затем делают подсчет, основываясь на проявленной ими реакции. Если наблюдается какое-то отклонение от произвольного движения мушек (50% с контрольной стороны и 50% — к трубке с запахом), то мутировавшие особи подвергаются дальнейшему анализу с точки зрения восприятия запахов. Джон Карлсон с коллегами из Йельского университета в 1989 году создал хитрый аппарат для определения чувствительности мушек к запахам, использовав для него ненужные лабораторные предметы — например, небольшие пробирки и микродозаторы. Ученые обездвижили мушек-мутантов и исследовали орган, передающий запахи в мозг, — усики. Так они выделили шесть разновидностей мутировавших мушек и смогли соотнести их с изменениями функций усиков. А ведь вполне может быть, что всякий из нас, кто заходит в парфюмерный магазин, тут же становится подопытным в похожем эксперименте, который кто-то проводит над людьми. Шучу-шучу, это вряд ли. Вернемся лучше к мушкам. Дело в том, что открытие целого ряда мутантов позволило описать генетику обоняния у мутировавших особей крошечной плодовой мушки с измененными органами обоняния, что, в свою очередь, привело к более полному пониманию того, как работает запах. В частности, исследователи додумались, что поскольку пахучие вещества — это молекулы, то рецепторы выявляют именно их. И ведь это мушки-мутанты подтолкнули ученых-дрозофилистов к подобной догадке.

Линда Бак и Ричард Аксель изучали процессы обработки запахов у позвоночных животных на примере крыс. Они провели эпохальное исследование, в ходе которого выявили у млекопитающих большой и разнообразный набор генов рецепторов, воспринимающих запахи. В конечном итоге Бак и Аксель пришли к выводу, что молекулы одоранта взаимодействуют с рецепторами как ключи с замками. Если у рецептора есть правильный «замок» для подходящего «ключа» одоранта, то он вызывает дальнейшие реакции в клетке, которые передают в мозг по нейронной сети информацию о появлении данного запаха.

Биологам-дрозофилистам потребовалось совсем немного времени, чтобы присоединиться к Баку и Акселю, но у них было преимущество: секвенирование генома их любимого организма близилось к завершению на год или два раньше человеческого генома, и они смогли получить полное представление о составе рецепторов запаха у дрозофил и механизмах их работы. Ученые нашли по крайней мере шестьдесят один ген обонятельных рецепторов в геноме дрозофилы. Ни один из них не имеет достаточного сходства с генами одорантов позвоночных, поэтому и называть их аналогичным образом нельзя. По сути, гены обонятельных рецепторов дрозофилы демонстрируют крайнюю дивергенцию секвенирования с генами других насекомых, что указывает на быстрое изменение этих рецепторов в процессе эволюции. Структура белков, кодируемых этими генами, очень интересна: все они следуют общей схеме встраивания в мембрану органа, который улавливает запахи, в случае насекомых — в усики. Типичный белок обонятельного рецептора проходит через мембрану клеток органа, воспринимающего запах, с так называемыми трансмембранными доменами. Торчащая из клетки часть обонятельного рецептора специфически связывает соединения, которые затем запускают внутриклеточные реакции в клетках рецепторов, сигнализирующие мозгу о наличии определенного запаха. Шестьдесят один ген обонятельных рецепторов дрозофилы — это ничто по сравнению с более чем одной тысячей, обнаруженной у нематоды

(круглого червя), и уж тем более по сравнению с примерно двенадцатью сотнями у слона. Но способность организма воспринимать запахи сложно измерить подсчетом генов обонятельных рецепторов.

Первая сложность заключается в том, что не все гены в геноме организма экспрессируются. Ведь даже наличие последовательностей, которые обычно встречаются в гене определенного вида, не означает, что ген активен. Неактивные гены называются псевдогенами, как я уже отмечал ранее. Отсутствие экспрессии псевдогенов обычно вызвано появлением терминирующего кодона, или стоп-кодона, который делает ген усеченным и нефункциональным. Стоп-кодон — это сигнал для механизма трансляции белка клетки прекратить преобразование гена в белок. Диапазон количества генов обонятельных рецепторов у позвоночных животных впечатляет своим многообразием (см. рис. 4.1 и вставку 4.3).

Вторая сложность в том, что даже шестьдесят один рецепторный белок дрозофилы может распознать множество запахов. Некоторые запахи можно определить довольно точно и при меньшем количестве рецепторов, ведь процесс обработки одорантов в мозге животного имеет комбинаторную природу. Один одорант может быть привязан не к одному рецептору, и, следовательно, нейрон получает несколько ответов от разных рецепторов. Кроме того, информация от нейронов с рецепторами сходится к локальным точкам обработки, которые называются гломерулами или клубочками. Там множественные сигналы могут объединяться, что позволяет точнее распознавать запах. Комбинаторный характер восприятия запаха означает, что с увеличением числа рецепторов способность воспринимать запахи также возрастает, но не линейно. Скорее увеличение потенциальных запахов растет экспоненциально по мере увеличения числа генов.

В дополнение к обонятельным рецепторам носовые проходы позвоночных содержат еще один вид белка, который работает в сочетании с ними. Эти белки называются рецепторами следо-

вых аминов — ТААР (*trace amine-associated receptors*), и то, как они функционируют, ясно из названия: они обнаруживают следовые количества небольших молекул аминов. Эти рецепторы в различных комбинациях находятся на обонятельном органе позвоночных, повышая их способность чувствовать запахи. Реакция на эти комбинаторные сообщения, посылаемые в мозг, формирует поведение, необходимое для выживания организма. Линда Бак и ее коллеги показали, что, хотя некоторые реакции ТААР/обонятельных рецепторов в мозге являются врожденными и аверсивными, они могут быть модулированы другими сигналами обонятельных рецепторов в мозг. Это открытие интересно тем, что сортировка запахов осуществляется в мозге на основе информации от большого количества сигналов, поступающих через нос. Человек по сравнению с некоторыми насекомыми сильно проигрывает в способности обнаруживать следовые количества вещества (см. вставку 4.4). Пожалуй, самый известный нюхательный навык у животных — умение чувствовать феромоны и обрабатывать эту информацию. Особенно хорошо это делают чешуекрылые (моль и бабочки), способные распознать маленькие молекулы феромонов на большом расстоянии (до трех километров).

Некоторые исследователи, изучающие запахи, полагают, что у людей не очень хорошо развито обоняние (см. вставку 4.3) и они — середнячки среди видов по количеству генов обонятельных рецепторов в геномах (мы находимся в нижней трети списка изученных организмов). Но при этом мы довольно типичны в том, что около половины наших генов обонятельных рецепторов являются псевдогенами. Кроме того, с начала XX века было принято считать, что люди распознают около десяти тысяч запахов. Однако в 2014 году Андреас Келлер и его коллеги опровергли это.

Келлер и его коллеги начали со 128 известных запахов. Затем они смешали в банках по десять, двадцать или тридцать наиболее распространенных из них. Для одного эксперимента (называемого тестом на различение) они подготавливали три банки: пер-

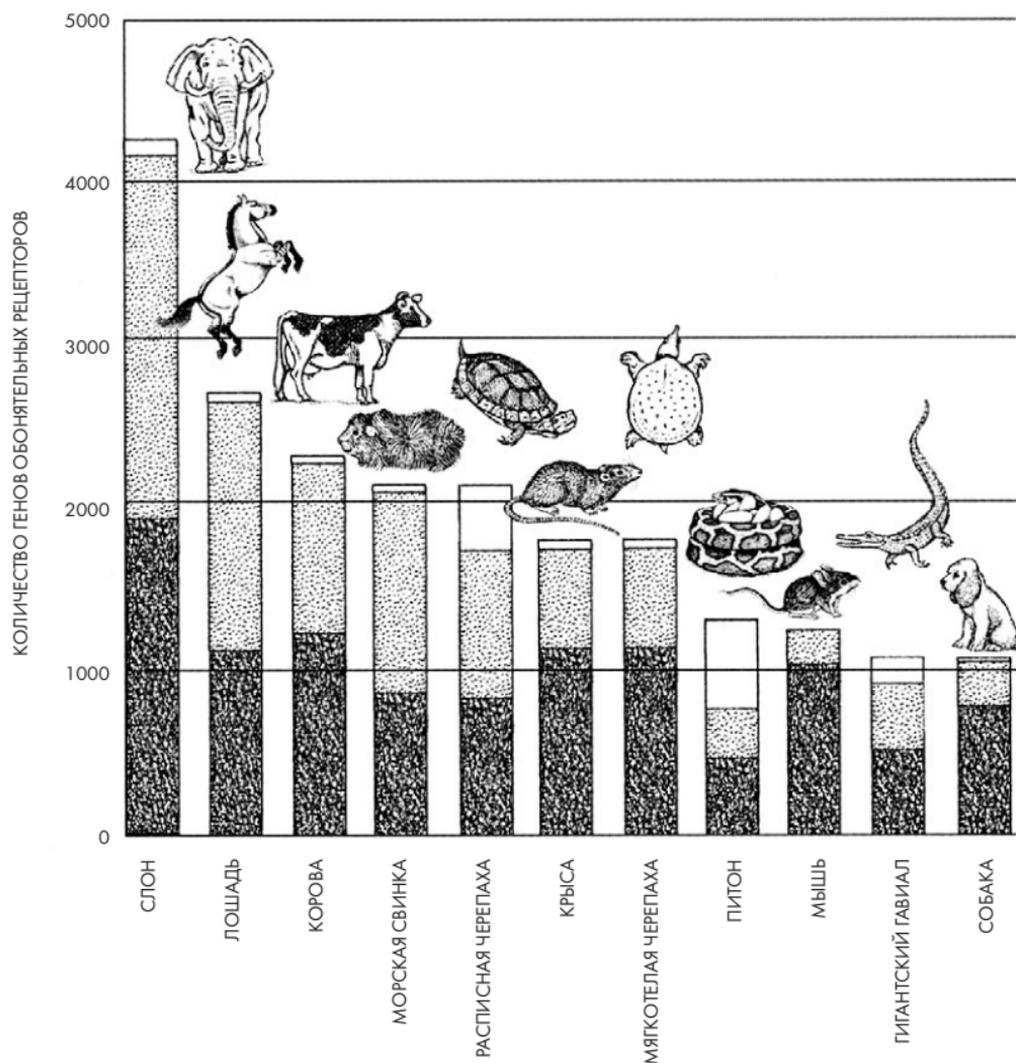
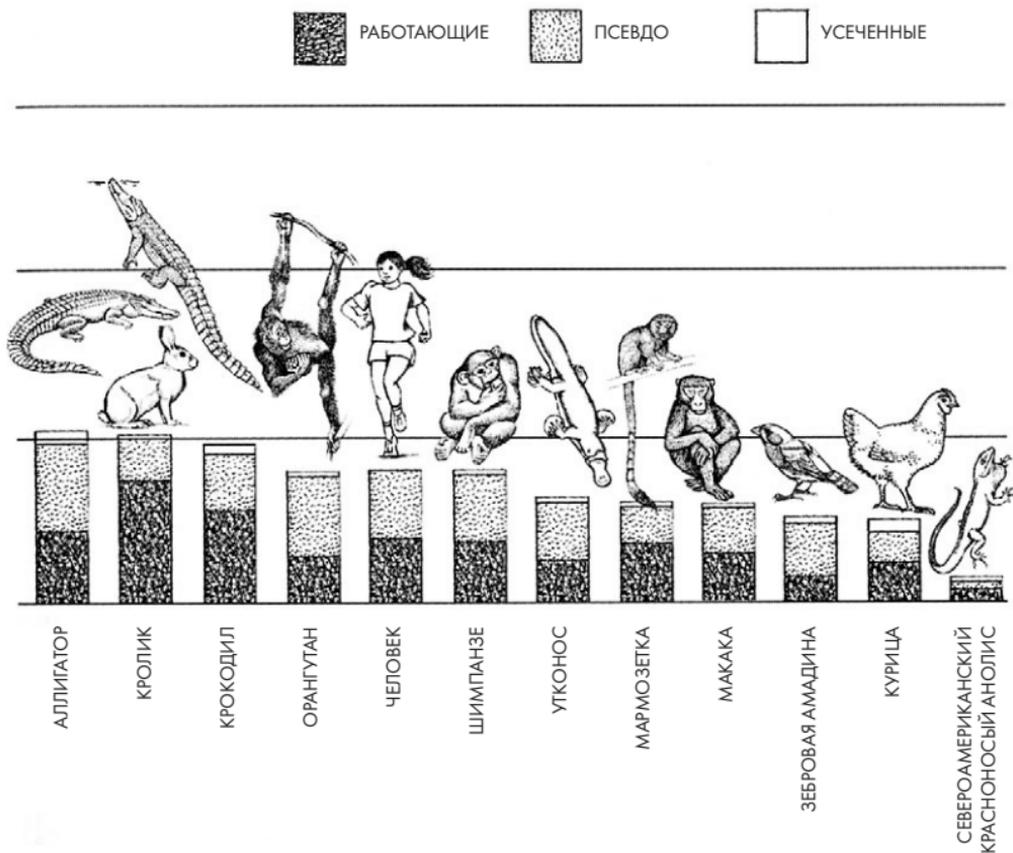


Рис. 4.2. Гистограмма, показывающая количество работающих, псевдо- и усеченных генов обонятельных рецепторов у различных позвоночных

вую и вторую — одинаковые и третью — чем-то отличающуюся от них. В опытах смеси были разбиты по парам таким образом, что в третьей банке некоторые пары не имели общих запахов, а другие были почти идентичны. Каждому участнику эксперимента было дано 260 тестов на различение, а потом результаты были сведены в таблицу. Все, что было необходимо, — это выяснить, когда способность обнаруживать различные запахи в составе смесей падает. Келлер и его коллеги оценивали это по количеству пересечений запахов в смесях. Поэтому они смешивали запахи, чтобы



в банках получалось, например, 25, 50, 75 или 95% пересечений. Если бы было 0% пересечений (то есть в двух тестовых банках вообще не было бы общих запахов), большинство респондентов легко бы эти банки различили. Если бы совпадение составляло 97% (один отличительный аромат в тридцати смесях запахов) и ни один субъект не мог бы определить разницу, то точка отсева была бы 97% и так далее. Оказалось, что точка отсева находится в диапазоне от 50 до 60%, и это означает, что, если запахи перекрываются менее чем, скажем, на 57%, большинство смесей различимы. Все, что превышает этот процент пересечения, практически неразлично. Методы интерпретации этих данных

4.3 | ГЕНЫ ОБОНЯТЕЛЬНЫХ РЕЦЕПТОРОВ У ЖИВОТНЫХ

У человека примерно восемьсот генов обонятельных рецепторов, но только лишь половина из них активна. Почти у всех позвоночных общее количество псевдогенов и усеченных генов превосходит количество функционирующих или близко к нему приближается. Есть и другой фактор, влияющий на число генов: их можно приобрести или потерять в процессе эволюции. У шимпанзе и человека более 6 миллионов лет назад был общий предок. Он имел уникальную комбинацию генов, влияющих на обоняние, которую он передал как шимпанзе, так и человеку, но с небольшими изменениями. Например, в процессе передачи генов человек получил от общего предка восемнадцать рецепторов запахов и утратил восемьдесят девять, а шимпанзе заполучил восемь генов, лишившись девяносто пяти. Приблизительно такая же картина наблюдается и у других таксонов при передаче генов от общих предков к современной особи. И это указывает на то, что по мере расхождения видов их обонятельная способность настраивается за счет потери и приобретения генов, необходимых для обнаружения специфических запахов. Таким образом, приобретение и потеря обонятельных рецепторов играют важную роль в общей способности организма чувствовать запах.

включают сложную статистическую и математическую обработку и выходят за рамки данной книги.

Но мы должны понимать результаты исследования, поэтому давайте посмотрим, что на самом деле демонстрирует нам математическая обработка данных. Для тридцати смесей запахов существует $1,54 \times 10^{29}$ возможных комбинаций, а для десяти запахов — $2,27 \times 10^{14}$. Это огромное количество, и человеческий нос и мозг способны различить далеко не все комбинации. Фокус в том, чтобы понять, сколько же именно может различить рецепторный аппарат обоняния человека. Математика приводит к поразительному выводу: в среднем люди могут различать 1,72 трил-

лиона — то есть 1720 000 000 000! — различных комбинаций, когда объединяются тридцать запахов. Было подсчитано, что дрозofiла различает только 65 000 различных запахов, а вот другие млекопитающие, вероятно, могут посоперничать с человеком. Это количество потенциальных комбинаций запахов значительно превосходит диапазон звуков, вкусов и зрительных образов, которые могут воспринимать люди. Все познается в сравнении: чувство, которое на первый взгляд казалось ахиллесовой пятой, на самом деле оказывается одной из лучших наших способностей.

4.4 | ЖИЗНЬ ГУСЕНИЦЫ

Французский энтомолог Жан-Анри Фабр стал первым, кто подробно описал реакцию феромонов в конце 1800-х годов. Он нашел кокон павлиноглазки грушевой (*Saturnia pyri*) (рис. 4.3) и стал наблюдать за ним. Вскоре из кокона появилась красивая самка. Ученый поместил ее в вольер и, не дожидаясь завершения процесса вылупления из кокона, пошел спать. На следующее утро он проснулся и обнаружил десятки самцов павлиноглазки грушевой, облепивших вольер. Он собрал самцов и снова оставил самку на ночь, но на этот раз решил подглядеть за происходящим. Он повторял этот ритуал несколько дней и ночей, и наградой ему стали примерно 150 прекрасных самцов. Фабр был плодовитым писателем, и он практически единолично возродил в конце XIX века интерес общественности к насекомым и энтомологии. Он описал свои наблюдения за павлиноглазкой грушевой в книге «Жизнь насекомых», и я приведу цитату оттуда, она лучше меня объяснит, почему ученый стал таким успешным популяризатором энтомологии: «Как я уже говорил, это был незабываемый вечер, вечер, королевой которого стала прекрасная павлиноглазка. Со всех сторон, откуда ни возьмись, слетались к ней влюбленные бабочки, сорок кавалеров, жаждущих засвидетельствовать свое почтение невесте на выданье, рожденной тем утром среди тайн моего кабинета. Давайте же пока не будем беспокоить рой ухажеров». Сам того не зная, Фабр описал феромонное притяжение у насекомых. Он даже признался, что не

понимал, каким образом самцы были «проинформированы» о самке поблизости. После нескольких десятилетий исследований ученым удалось расшифровать тот тайный код оповещения: это был «запах женщины», самцы просто-напросто унюхали присутствие самки. О да, мы, позвоночные, тоже реагируем на феромоны!



Рис. 4.3. Павлиноглазка грушевая, или большой ночной павлиний глаз, обнаруженный Фабром

ВО ВСЕ ГЛАЗА (И УШИ)

Как животные слышат и видят

— Летучая мышь, как ты видишь по ночам?

— Я издаю тоненький звук, который отскакивает от всего, с чем сталкивается. Я вижу слышая.

Даррин Ланде,
энтомолог и писатель

И слух, и равновесие связаны с процессами, происходящими внутри уха, и имеют прямое отношение к восприятию информации и передаче ее в мозг, поэтому вполне логично обсудить их вместе. Внутреннее ухо, где расположены управляющие этими чувствами структуры, представляет собой удивительно сложное и запутанное устройство с различными движущимися деталями. Вспомните про хитроумный аппарат Руба Голдберга!¹ Если бы какой-нибудь инженер увидел строение внутреннего уха различных позвоночных, вряд ли бы он смог объяснить, что и как там работает, — ведь эволюция не создает совершенные или логические композиции в организмах. Но можно сказать наверняка: он заметил бы, что все эти структуры имеют одинаковые составляющие и являются модификациями одного базового устройства. А если бы инжене-

¹ Машина Голдберга, или Робинсона — Голдберга, — это устройство, которое выполняет очень простое действие чрезвычайно сложным образом, как правило посредством длинной последовательности взаимодействий по «принципу домино». Эти машины получили свое название от имен американского карикатуриста и изобретателя Руба Голдберга и английского художника Уильяма Робинсона, которые использовали изображения таких машин в своих работах.

ру показали органы слуха насекомых, он абсолютно был бы сбит с толку: слуховые аппараты этих созданий развивались независимо друг от друга по нескольким линиям, и между их структурами практически нет ничего общего, за исключением функции, которую они выполняют. Предок всех козявок и букашек был глухим, и история развития «ушей» насекомых связана с преобразованием существовавшей в их телах структуры в органы слуха.

Зачем насекомым вообще что-то слышать? Сотни тысяч видов насекомых, живущих сегодня на планете, не имеют слуховых аппаратов и ничего не слышат. Например, только малая часть из 350 000 известных видов жуков может похвастаться наличием этой опции. Эволюционный анализ показывает, что у разных групп насекомых слух возник независимо друг от друга около 65 миллионов лет назад. Что-то очень серьезное спровоцировало этот сдвиг в восприятии мира насекомыми. Не будем ходить вокруг и около: это были летучие мыши.

Летучие мыши охотятся с помощью эхолокации. Некоторые птицы, живущие в пещерах, и морские млекопитающие тоже используют этот трюк, чтобы «услышать» свое окружение. При эхолокации животное издает звук, а потом прислушивается к собственному эху. Измеряя время, необходимое для возвращения эха, животное узнает, есть ли вокруг него нечто, а если есть, то где именно оно находится. Благодаря тому что у животных по два уха, система приема звука работает довольно эффективно: каждое ухо слышит по-разному, и эти различия используются для более точного определения местоположения объектов, включая и летающих насекомых. У насекомых со слухом есть шанс избежать встречи с хищником, использующим эхолокацию: надо лишь перехватить сигнал и действовать на опережение — на войне как на войне. Последние 65 миллионов лет летучие мыши и летающие насекомые ведут гонку вооружений, постоянно наращивая свой военный потенциал: эхолокацию и слух. Ну а в награду за эту неустанную борьбу насекомые получают прекрасный побочный эффект: развитый слуховой аппарат способствует усовершенствованию процесса спаривания.

Существует две основные группы рукокрылых: летучие мыши (*Microchiroptera*) и крылановые (*Megachiroptera*). Представители семейства *Megachiroptera* — крылан и его родственники — плодоядны и, за исключением одного вида, не используют эхолокацию для поиска пищи. В их арсенале есть щелчковое звукоизвлечение, сильно отличающееся от того, что используют летучие мыши при эхолокации, издающие гортанью высокочастотный звук в диапазоне между 14 000 и 100 000 Гц и затем испускающие его через рот и нос. Чем больше колебаний звука в секунду, тем выше частота. Человек воспринимает звуки в диапазоне от 20 до 20 000 Гц, поэтому слышит лишь некоторые крики летучих мышей. Звукоизвлечение у летучих мышей — это особый, характерный только для этого вида механизм: адаптируясь к определенной окружающей среде, животное также подгоняет под нее частоту звука эхолокации. И хотя некоторые летучие мыши пересекаются по диапазону частот эхолокации, исследователи разработали фонотеку криков летучих мышей, похожую на те, что орнитологи создали для звуков, издаваемых птицами.

Но как же развивались уши у организмов? Один из способов — медленное, но устойчивое накопление изменений. Чарльз Дарвин считал, что именно так и развивалась жизнь. Процесс едва заметных изменений был сформулирован в книге «Происхождение видов» как универсальный принцип развития жизни. Дарвина поразила работа геолога Чарльза Лайеля, и его «Основные начала геологии» он даже взял с собой в путешествие на корабле «Бигль». Лайель четко объяснил, что изменения геологии Земли, такие как формирование горных хребтов и эрозии, происходили постепенно, а Дарвин проецировал аналогичную концепцию на эволюцию живых организмов. Этой теории градуализма, или последовательного развития, придерживались биологи, которые первыми начали изучать эволюционные процессы живой природы. Она господствовала в науке до 1970-х годов, вплоть до появления теории прерывистого равновесия, предложенной Найлсом Элдриджем и Стивеном Джеем Гулдом. Этот механизм пробуждает «обнадеживающего монстра». Этот термин впервые

применил зоолог Рихард Гольдшмидт в XIX веке, а в 1970-е годы Гулд его снова воскресил, чтобы как-то растолковать новшества процесса дивергенции. Мы уже упоминали в главе 3 одного потенциального «обнадеживающего монстра» — циклопа, который хоть и чудовищен на вид, но вряд ли способен вселить в кого-то надежду собственным примером по выживанию в природе. Значительные генетические изменения обычно сопровождаются летальным исходом для мутировавшего организма — не слишком завидная судьба для «обнадеживающих монстров». Подобный побочный эффект, весьма распространенный в экспериментальной генетике и биологии развития, возникает из-за того, что ген одновременно проявляет множественные действия. Этот феномен называется плейотропией и представляет собой еще один эволюционный путь развития организмов, в ходе которого появляются новые структуры и типы поведения. Таким образом, мутация в гене, способная при определенных обстоятельствах породить «обнадеживающего монстра», при иных путях развития может стать смертельной. Формирование у насекомых слуха и чувства равновесия — прекрасная история о работе эволюции в мире «обнадеживающих монстров» и плейотропии.

Предки слышащих насекомых — да и всех насекомых вообще, — по всей видимости, обладали прекрасно развитым чувством равновесия. Частично равновесие у насекомых обеспечивают хордотональные органы — небольшие скопления нервных клеток, сообщающие мозгу, насколько сильно растянута ткань между соседними сегментами тела. Насекомое определяет свое местоположение в пространстве на основе смещения двух сегментов относительно друг друга. Это основной проприоцептивный механизм, необходимый насекомым для эффективного передвижения. Хордотональные органы состоят из клеток механорецепторов, которые тоже реагируют на колебания, и, следовательно, они либо заранее были адаптированы под то, чтобы различать звуки разной частоты, либо, наоборот, утратили эту функцию (см. главу 4). Для поддержания равновесия хордотональные органы в качестве проприоцептивного механизма располагаются везде,

где существуют соединения сегментов структур. Это означает, что существует возможность развития уха в самых причудливых местах, например на животе и ногах. И кажется, эволюция поспешила воспользоваться этим шансом и тут же превратила многие первичные хордотональные органы в уши.

Есть еще один возможный механизм эволюционного развития ушей, который я уже упоминал: по принципу экзаптации. Одни насекомые экзаптировали хордотональные органы своих усиков, чтобы появились уши, а другие использовали их для образования ротовых органов. Разные отряды насекомых независимо друг от друга проходили процесс экзаптации раз десять. У некоторых насекомых уши расположены на усиках: в основном это двукрылые — мухи и комары. Орган проприоцепции (так называемый джонстонов орган) превратился у них в орган слуха, чтобы они могли интерпретировать звуки взмахов крыльев представителей своего вида. Взмахи крыльев — это важная часть процесса ухаживания у этих двукрылых. У других насекомых ушами стали соединения хордотональных органов на крыльях и лапках. А еще области между соседними сегментами имеют хордотональные органы, и те несколько раз преобразовывались в уши. Именно поэтому у некоторых насекомых появились уши на животе — это так называемые тимпанальные органы. Чаще всего трансформируется лишь одна пара хордотональных органов (по одному с каждой стороны), но у кузнечиков *Bullacris membracioides* в уши превратились хордотональные органы мочевого пузыря — по шесть с каждой стороны, и теперь у них двенадцать тимпанальных ушей на животе.

Хорошо знакомые нам уши позвоночных, вероятнее всего, появились лишь раз (очевидно, что эволюция работает разными методами: с одной группой организмов так, а с другой — иначе). Позвоночные существуют уже более 500 миллионов лет, а насекомые — около 400. Если бы эволюционный процесс работал на одном уровне в обеих группах, то можно было бы ожидать, что в обеих линиях развития уши возникли бы одинаковое количество раз независимо друг от друга. Однако у насекомых «новые»

уши появляются в десять раз чаще, чем у позвоночных. Чтобы понять, почему же уши позвоночных такие статичные, необходимо рассмотреть, как в ходе эволюции вели себя пять костей, расположенных рядом с челюстью по обеим сторонам головы.

Давайте посмотрим на расположение этих костей у трех классов организмов (костных рыб, рептилий и млекопитающих). Это даст нам возможность увидеть, как с течением времени менялись такие черты, как челюсти и уши. Чтобы этот процесс был более продуктивным, нам нужно знать, какие структуры перешли к нам от предков, а какие эволюционировали, поэтому нам понадобится внешняя группа, как говорят эволюционные биологи. Неплохой внешней группой для изучения костных рыб, рептилий и млекопитающих могут стать примитивные миксиновые и миноговые. Нас интересуют следующие пять костей: зубная, сочленовная, чешуйчатая, квадратная и слуховая (или стремечко). Поскольку в ходе эволюции кости рыб, рептилий и млекопитающих изменились, внутреннее ухо каждого из этих трех организмов имеет отличную от других структуру. Органы равновесия, тоже находящиеся во внутреннем ухе, очень хорошо развиты у рыб, поэтому есть смысл рассмотреть их именно на примере миксиновых и миноговых.

У миксинов и миног есть везикулы внутреннего уха, но нет челюстей. Рыбки прекрасно без них обходятся, ведь питаются они, захватывая добычу языком или присасываясь к источнику пищи. Анатомия их голов довольно бесхитростна, а что касается пяти костей, которые нас интересуют, — их либо нет, потому что нет челюстей, либо их настолько сложно различить, что нельзя с полной уверенностью говорить об их существовании. Внутреннее ухо этих двух видов рыб устроено очень просто, и можно предположить, что было оно и у общего предка всех позвоночных — как бесчелюстных, так и имеющих челюсти. А вот кости головы у этих двух примитивных организмов выглядят иначе, чем у челюстных позвоночных, и можно констатировать, что лишь внутреннее ухо досталось в наследство всем позвоночным без разбору. И хорошо, что так: ведь именно внутреннее ухо командует парадом звуков и управляет законом равновесия.

Органы равновесия во внутреннем ухе существуют и во внешних группах, но в модифицированной форме. Внутреннее ухо миксинов имеет только один полукружный канал — отвечающую за баланс структуру, похожую по форме на трубку. Рядом с полукружным каналом находится участок нервных клеток, на котором расположены волоски, действующие как органы равновесия. У миноги уже два полукружных канала и участки нервных клеток с волосками, работающими в качестве датчика механорецепторов для равновесия. У более продвинутых позвоночных (костных рыб, рептилий и млекопитающих) есть три таких канала, расположенные подобно трем осям (X, Y и Z) трехмерной системы координат. То, что полукружные каналы отвечают за равновесие, хорошо известно, а равновесие, как я говорил ранее по отношению к приматам, имеет решающее значение для выживания. Для некоторых млекопитающих чувство равновесия было не столь критично, и развитие внутреннего уха у этих организмов служит биологам еще одним важным доказательством проявления эволюции и ее важности в мире природы (см. вставку 5.1).

Рыбы поддерживают равновесие с помощью другой структуры, называемой боковой линией. Эта система баланса, встречающаяся у большинства рыб, распознает движения и вибрации внешней среды. Боковая линия состоит из клеток на коже, которые называются волосковыми. Движение или вибрации смещают волоски на боковой линии, и через механорецепторный механизм информация преобразуется в нервный сигнал, посылаемый в мозг. Боковая линия в точности соответствует своему названию — это линия волосковых клеток, тянущаяся от жабр до хвоста. И хотя большинству рыб она нужна, чтобы фиксировать вибрации вокруг них, у некоторых видов в процессе эволюции клетки боковых линий изменились так, что стали воспринимать и электрические импульсы. То есть к обнаружению движения и вибраций вокруг тела добавилась и функция распознавания электрических импульсов других животных. Конечно, для того чтобы такие модифицированные электрорецепторные клетки были полезны, необходимо электрическое поле, и есть два способа его получить.

5.1 | ОСТАТОЧНОЕ ЧУВСТВО РАВНОВЕСИЯ У ЛЕНИВЦЕВ

Исследователи проанализировали пластичность или возможность расширения полукружных каналов на примере млекопитающих, которым не слишком нужно равновесие. Трехпалые ленивцы как раз одни из них. Двигаются они чрезвычайно медленно, и, по утверждению авторов статьи, в которой рассматриваются состояния полукружных каналов ленивцев, «большие расстояния, скорость и ловкость — совсем не то, что присуще этим животным». Ленивцы время от времени спускаются с верхушек деревьев, чтобы испражниться, но в целом им не нужно сильно развитое чувство равновесия. Эволюционный биолог Джерри Койн, сторонник дарвиновской теории, подчеркнул, что его представления о рудиментарных органах подтверждаются предсказаниями самого Дарвина, утверждавшего, что черты, не являющиеся объектом естественного отбора, могут демонстрировать высокие степени вариативности, а порой даже и утрачиваться. Гийом Билле и его коллеги исследовали внутреннее ухо нескольких трехпалых ленивцев и обнаружили, что при любом способе измерения структуры полукружных каналов ее вариативность у ленивцев гораздо шире, чем у других млекопитающих. Такая высокая степень изменчивости указывает, что естественный отбор в отношении этих структур проявил всю свою мягкость. Койн отметил, что красота исследования не в демонстрации рудиментарных органов, ведь эволюционные биологи могут показать пытливым умам много других замечательных образцов. Что действительно примечательно в этой работе, так это то, что ученым удалось поймать полукружные каналы на полпути к их превращению в рудименты.

Во-первых, некоторые рыбы при помощи этих рецепторов фиксируют электрические поля, которые сами и генерируют. Эти рыбы используют волосковые клетки в процессе, называемом электролокацией. Это работает примерно так же, как и эхолокация, только с применением электрических полей. Во-вторых,

все организмы являются пассивным источником электрических полей: нервная система любого существа все время производит электрические импульсы. И рыбки с электрорецепторами активно этим пользуются для обнаружения добычи и хищников.

Электрорецепция не уникальное явление в животном мире, она несколько раз появлялась в ходе эволюции. Пожалуй, самый примечательный случай этой конвергенции — утконос. Это странное создание принадлежит к небольшому отряду млекопитающих, называемых однопроходными или яйцекладущими. Есть у них и система электрорецепции, которая развилась не из боковой линии, а из клеток кожных желез, превращенных в процессе эволюции в клетки со свободными нервными окончаниями. Многие однопроходные млекопитающие обзавелись электрорецепцией, но утконос превзошел всех родственников: сорок тысяч модифицированных клеток кожи полосками расположились вдоль его клюва. Утконосы — довольно хорошие охотники, и, скорее всего, это заслуга электрорецепторов. Существуют и другие позвоночные с подобной способностью, включая некоторые виды дельфинов, но анатомическое происхождение их электрорецепторов не связано с трансформацией боковой линии и не имеет ничего общего с процессом адаптации однопроходных.

Как уже отмечалось, у миксина нет челюсти, поэтому на следующем этапе неплохо было бы разобрать по косточкам организмы, у которых она есть. Анатомическая структура, прозванная нами челюстью, — наследственная характеристика костистых и хрящевых рыб, рептилий, птиц и млекопитающих (рис. 5.1). У челюстных рыб тоже довольно сложно выделить те пять костей, которые нас интересуют. У примитивных осетрообразных кости головы слиты в одну сплошную пластину, поэтому разглядеть отдельные кости чрезвычайно сложно. А вот у более развитых костных рыб отдельные кости уже узнаваемы: можно легко различить и определить три кости — зубную, сочленовную и чешуйчатую, но нет никаких следов квадратной и слуховой. У рыб нет ни наружного уха, ни среднего, поэтому можно уверенно сказать, что

три кости, которые можно распознать в их челюсти, находятся за пределами слухового органа. Две искомые кости появляются у рептилий: квадратная расположена за пределами внутреннего уха, а слуховая — внутри его, соединяясь с мембраной, называемой барабанной перепонкой. Обратите внимание, что сочленение челюсти у костных рыб происходит при контакте квадратной и сочленовной костей, и это универсальная характеристика челюстей рыб, рептилий, птиц, черепах и земноводных, но не млекопитающих, счастливых обладателей сложно устроенного внутреннего уха. Квадратная и сочленовная кости челюстного шарнира у млекопитающих превращаются в кости внутреннего уха: молоточек (сочленовная кость) и наковальню (квадратная). Эта новая аранжировка наших старых пяти костей — суставной, квадратной, слуховой, или молоточка, наковальни и стремечка, особенно трех последних, — и составляет трехкостное внутреннее ухо людей и других млекопитающих. Челюсть млекопитающего представляет собой сочленение чешуйчатой и зубной костей. Это преобразование в конечном итоге направлено на бережливое использование челюстных костей. Среди млекопитающих был и остается строгий отбор, направленный на поддержание этих костных структур и суставов, и поэтому в общем расположении костей их внутреннего уха мало что изменилось. Но диапазон звуковых длин волн, воспринимаемых млекопитающими, может варьироваться в результате изменения других структур внутреннего уха или даже некоторых структур среднего уха и наружного. Достаточно взглянуть на размер наружного уха у млекопитающих, которым необходим острый слух (как правило, большие уши означают высокую остроту слуха), чтобы увидеть, как оно видоизменяется в ответ на отбор при необходимости воспринимать и передавать в мозг какие-то очень специфические звуки.

Модификация внутреннего уха млекопитающих, которая может привести к изменению их диапазона слуха, направлена на развитие спирального мембранного расширения в нижней части внутреннего уха, называемого улиткой. Млекопитающие — единственные позвоночные с хорошо развитыми кохлеарными, или



Рис. 5.1. Сравнение челюстных костей млекопитающего и рептилии

улитковыми, структурами. По длине и составу этой мембранной структуры уши разных млекопитающих сильно различаются. Улитки отличаются по общему объему, количеству витков спиралей, общей длине, диаметру, плотности закручивания спирали и кривизне — все это так или иначе связано с тем диапазоном звуковых частот, который может распознать млекопитающее. Например, млекопитающие с большим диаметром улитки более чувствительны к высокочастотным звукам. Эволюция размера ушной улитки — это один из способов, помогающий млекопитающим приспособиться к восприятию звуковых волн различных частотных диапазонов. Степень изменчивости кохлеарных структур млекопитающих впечатляет: сколько же любопытного могут они услышать!

СУПЕРНЮХАЧИ И СУПЕРДЕГУСТАТОРЫ

Ограничения восприятия запаха и вкуса у человека

Те, кто всю свою жизнь думает исключительно о вкусе, кажутся мне немногими странными.

ДЖОНАТАН САФРАН ФОЕР, писатель

Все мы чувствуем по-разному, и выявление этих отличий может стать неплохим способом узнать, как же все это работает у людей. Некоторые приведенные ниже примеры достойны упоминания в Книге рекордов Гиннесса, а быть может, они уже есть в этом занимательном списке пределов человеческих возможностей.

Джой Милн чувствует запах болезни Паркинсона. Ей дали шесть футболок, которые носили люди с болезнью Паркинсона, и шесть футболок здоровых людей, и она безошибочно определила, кому принадлежали одиннадцать из них. Неплохо, да? И даже лучше, чем неплохо, потому что фактически она угадала двенадцать из двенадцати — бинго! Один результат был ложноположительным: та футболка, которую Джой якобы опознала неверно, принадлежала условно здоровому человеку, которому немного позже тоже поставили страшный диагноз. Запах болезни Паркинсона был невыносим для Джой: эта разрушительная неврологическая болезнь все больше и больше затягивала ее мужа в свои сети. К сожалению, он так и не выбрался. Уникальная способность проявилась у женщины, когда положение мужа стало совсем тяжелым: однажды она заметила, что он начал источать терпкий мускусный запах. Обычно считается, что запах исходит от под-

мышек или какой-то другой сильно потеющей области тела, но на самом деле его источают сальные железы спины, подбородка, шеи и лба. Эти железы содержат секрет, называемый кожным салом (или кожным жиром), который оставляет на коже характерный блеск в тех местах, где он выделяется. По-видимому, футболки пропитались запахом этого жира, и нос Джой сработал на все сто.

Есть еще одно неврологическое расстройство, неким образом сопряженное с запахом. Данные, представленные в 2015 году, говорят, что при диагностике болезни Альцгеймера было бы не лишним проверять обоняние. Болезнь Альцгеймера — это нарушение мозговой деятельности, которое обычно возникает у людей пожилого возраста. Клинически оно характеризуется потерей памяти и спутанностью сознания на ранних стадиях и крайней неврологической дегенерацией на более поздних стадиях. В мозге людей с этим расстройством развиваются большие бляшки, которые и считаются одной из причин неврологических проблем, связанных с болезнью Альцгеймера. Это единственная смертельная болезнь из первой десятки, против которой нет никакого лекарства. Эффективного способа замедлить ее развитие тоже пока нет. Чаще всего от болезни Альцгеймера страдают люди западноевропейского происхождения. Сорок четыре миллиона человек, в том числе пять миллионов американцев, поражены этим недугом. Кроме того, по оценкам ежегодно от этой болезни умирают семьсот тысяч человек. Уже с 1980-х годов ученые знают, что у некоторых (хотя и не у всех) пациентов с болезнью Альцгеймера сильно ухудшается обоняние. У мышей, получавших с кормом небольшое количество бета-амилоида — белка, обнаруженного в мозге людей, страдающих болезнью Альцгеймера, — тоже появились бляшки в мозге: их образование как раз увязывают с потреблением бета-амилоида. Ученые проверили обонятельные способности подопытных мышей и обнаружили, что те, во-первых, дольше, чем обычные мыши, обнюхивали предметы, а во-вторых, не могли запомнить запах. Мыши используют запах для интерпретации внешнего мира, и потеря обоняния, связанная с накоплением в организме бета-амилоида, для них весьма

трагична. Исследователи приступили к изучению подобных явлений и у людей, ведь эксперимент с мышами показал удивительный результат: обонятельные способности вернулись к ним сразу же после выведения бета-амилоида из организма.

Соотнести болезнь Альцгеймера с потерей обоняния или изменением способности к восприятию запахов не так-то просто. Даже если выявить у носителей этого заболевания корреляцию со снижением обоняния, ранней диагностике это никак не поможет. Крайне важно выявить снижение восприятия запахов у человека еще до начала расстройства, и тогда потеря обоняния может стать надежным диагностическим инструментом. Исследователи из нескольких учреждений в Нью-Йорке разработали обследование для диагностики болезни на основе нарушения обонятельной способности до появления симптомов. Около четырехсот пожилых людей (средний возраст — восемьдесят лет) без симптомов болезни Альцгеймера прошли тест Пенсильванского университета на идентификацию запаха (UPSIT). Тест содержит сорок образцов различных запахов, которые представляют собой пластинки микрогранул, нанесенные на плотную бумагу. При прохождении теста нужно царапнуть поверхность образца, понюхать ее, а затем ответить на вопрос о запахе, выбрав один из четырех предложенных вариантов. Все ответы были сведены в таблицу и сопоставлены с ответами контрольной группы, состоящей из четырех тысяч человек с нормальной обонятельной способностью. Кроме того, 387 участников были обследованы с помощью магнитно-резонансной томографии (МРТ) для оценки толщины энторинальной коры головного мозга. Это та часть мозга, которую в первую очередь затрагивает болезнь Альцгеймера, и логично именно с нее начинать изучение анатомических изменений. Через четыре года с участниками исследования снова связались: у 20% из них появились признаки снижения умственных способностей, а почти у 13% развилась болезнь Альцгеймера. И теперь фокус в том, чтобы вернуться к данным UPSIT и МРТ и понять, как они соотносятся с развитием этой болезни.

Удивительно, но результаты теста, указывающие на снижение обонятельной способности, коррелировали с развитием болезни Альцгеймера, а вот утолщение энторинальной коры, выявленное при МРТ, — нет. Участниками другого исследования стали восемьдесят четыре пожилых человека: им предложили пройти тест UPSIT, чтобы понять, как потеря обоняния соприкасается с болезнью Альцгеймера. На этот раз исследователи вместо МРТ головного мозга сделали пожилым людям (средний возраст — семьдесят один год) позитронно-эмиссионную томографию (ПЭТ) и проанализировали их спинномозговую жидкость. ПЭТ КТ позволяет обнаружить бляшки в головном мозге, а биохимический анализ спинномозговой жидкости — амилоид. И то и другое — диагностические признаки болезни Альцгеймера. Полгода спустя у 67% участников обнаружили признаки снижения когнитивных функций. Самой эффективной диагностикой оказался положительный тест на наличие амилоида (с использованием ПЭТ или спинномозговой жидкости). Но и UPSIT показал себя очень хорошо: те, кто набрал баллы ниже определенного порога шкалы, оказались в три раза более склонны к когнитивному спаду, чем те, кто превысил этот порог. Оба исследования подтверждают, что тестирование UPSIT может быть хорошим ранним индикатором возникновения этого ужасного заболевания. Низкие баллы по шкале UPSIT — это маячок для раннего вмешательства, которое поможет обуздать прогрессирование этого изнурительного расстройства.

Способность чувствовать запах болезни Паркинсона и снижение обонятельных функций из-за болезни Альцгеймера являются прекрасными примерами диапазона человеческого обоняния. В первом случае человек развил острое чутье и стал «супернюхачом», а во втором — люди потеряли способность воспринимать запахи. Все это происходит в носу, а потом направляется прямо в мозг. Информация из носа обрабатывается в небольшой области мозга, называемой обонятельной долей.

Давайте поговорим о Джой Милн. Судя по фотографиям, у нее абсолютно обычный на вид нос снаружи и, скорее всего, такой же

заурядный внутри (рис. 6.1). Снаружи ее нос украшают две ноздри, через которые вдыхаются маленькие молекулы, составляющие запахи. Внутри, вероятно, есть совершенно нормальный носовой проход, выстланный тонкими волосками, создающими барьер для крупных частиц пыли и другого мусора из воздуха. Должно быть, обычно выглядит и ее носовой эпителий, где берет свое начало процесс обоняния. Даже если взглянуть на него в электронный микроскоп, вряд ли можно заметить что-то помимо двух привычных видов клеток. Первый вид — ствольные клетки, которые генерируют новые нервные клетки носа на протяжении всей жизни. А вот клетки второго вида более сложные, но даже они в носовом эпителии Милн будут похожи на клетки любого другого носового эпителия.

В носовом эпителии Джой Милн миллионы нервных клеток. На обращенном наружу конце каждой из них находятся небольшие, похожие на волоски элементы, называемые ресничками. Именно они взаимодействуют с воздухом, проходящим через носовую полость. Эти реснички как бы плавают в большом количестве слизи. На другом конце клетки, обращенном внутрь, расположены отростки, называемые аксонами. Они идут к строго определенной части мозга — обонятельной луковице, которая тянется от участка под лобной корой и подходит довольно близко к носу. Там находятся примерно двадцать пять митральных клеток, которые связывают аксоны в пучки. На каждой из митральных клеток оканчивается до двадцати пяти тысяч аксонов. Апикальные дендриты митральных клеток входят в состав микроскопических тел, называемых клубочками или гломерулами. Подобные клубочки есть и у Джой Милн, а ее обонятельные луковицы наверняка тоже выглядят довольно обычно.

Но на обонятельной луковице ничего не заканчивается. Нейроны выходят из клубочков и соединяют ее с обонятельной корой, которая тянется до границы с височной долей. Именно этот путь от луковицы до коры головного мозга, по мнению исследователей, отвечает за хранение воспоминаний о запахах. По сути, именно здесь в мозгу Марселя Пруста хранилась память о знаменитом печенье «Мадлен» (см. вставку 6.1). Но информация с ресничек

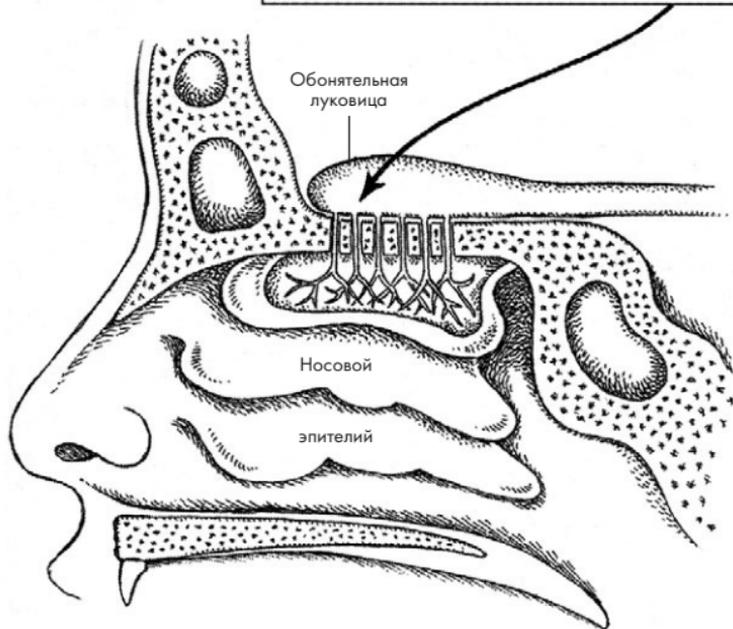
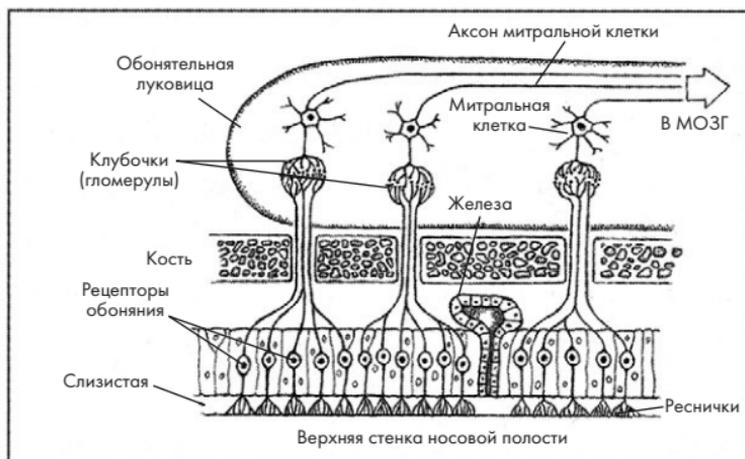


Рис. 6.1. Строение носового прохода и эпителия. Вставка: клубочки (гломерулы) и связи с обонятельной луковицей

проходит немного дальше в мозг, к орбитофронтальной коре, где она интегрируется с другими высшими функциями мозга. Я готов поспорить, что у Джой Милн наверняка довольно обычная обонятельная луковица, нормальная обонятельная кора и вполне заурядная орбитофронтальная кора.

Так в чем же тогда секрет Джой Милн? Откуда у нее эта суперспособность? Быть может, тот самый мускусный запах, вызывающий в ее памяти большие воспоминания, способен что-то

6.1 | «МАДЛЕНКА» ПРУСТА

«Мадленки», бисквитное печенье в форме морских гребешков, своей известностью обязаны Марселю Прусту и его роману «По направлению к Свану»¹. Это печенье стало своего рода метафорой сохраненных воспоминаний: образцом того, насколько яркими и чудесными они могут быть и как легко вызываются простой сенсорной стимуляцией, такой как запах. «Она послала за теми коротенькими и пухлыми печеньицами, их еще называют мадленками, которые словно выпечены в волнистой створке морского гребешка. И, удрученный хмурым утром и мыслью о том, что завтра предстоит еще один унылый день, я машинально поднес к губам ложечку чая, в котором размочил кусок мадленки. Но в тот самый миг, когда глоток чая вперемешку с крошками печенья достиг моего нёба, я вздрогнул и почувствовал, что со мной творится что-то необычное. На меня снизошло восхитительное наслаждение, само по себе совершенно беспричинное. Тут же превратности жизни сделались мне безразличны, ее горести безобидны, ее быстротечность иллюзорна...»²

прояснить в этой истории. Происхождение этого специфического запаха — загадка. Причиной его возникновения вполне может быть белок альфа-синуклеин, играющий особую роль в проявлениях болезни Паркинсона. Этот белок составляют целых 140 аминокислот (это на пару порядков больше, чем большинство молекул, ответственных за запахи), а его трехмерная структура напоминает по форме разогнутую скрепку. Альфа-синуклеин также ответственен за потерю обоняния у людей с болезнью Паркинсона, потому что образует сгустки в обонятельной луковице. Он сразу же попал под подозрение из-за этих скоплений в обоня-

¹ Первый роман Марселя Пруста из цикла «В поисках утраченного времени». — *Прим. ред.*

² Пер. Е. Баевской.

тельной луковице и других областях мозга: он вполне может быть причастен к тому едкому запаху, что так безошибочно улавливает Милн. Но сам запах исходит от кожного сала и может быть какой-то другой, более мелкой молекулой.

Люди уже довольно давно используют мускусные запахи, и большинство пахнущих мускусом твердых веществ и жидкостей теперь синтезируются искусственно. Скорее всего, впервые мускус был получен из желез кабарги, или мускусного оленя. Мешочек с мускусом расположен на брюхе самца и похож на мошонку (слово «мускус» происходит от слова «яички» на санскрите). Любой, кому довелось оказаться рядом с кабаргой или бобром, подтвердит, что натуральный мускусный запах отнюдь не из приятных. Чтобы получить приятный аромат, нужно его разбавить и смешать со спиртом, иначе он довольно дурно пахнет. За этот запах отвечает большое количество молекул, и все они являются частью жидкости, которая накапливается в мускусном мешке кабарги. Большинство из этих молекул содержат семнадцать или восемнадцать атомов углерода (в отличие от огромного альфа-синуклеина, состоящего из двенадцати сотен). Атомы разной формы обычно расположены неправильным кольцом и имеют гораздо меньший размер по сравнению с альфа-синуклеином.

Когда речь заходит о работе нервных клеток в носовом эпителии, форма молекулы мускуса имеет значение. В мембранную часть ресничек в назальном эпителии нервных клеток встроены относительно большие молекулы, которые закономерно называются белками обонятельных рецепторов. Эти белки надежно встроены в мембрану, поскольку белковые петли семь раз входят в нее и выходят обратно. Петля начинается с внешней стороны клеточной мембраны, входит внутрь, выходит, входит, выходит, входит, выходит и, наконец, снова входит внутрь клетки. У самого белка есть два «действующих конца»: один находится внутри клетки, а другой — снаружи. Часть белка, «торчащая» за пределами мембраны, формируется из аминокислот, которые находятся на другом конце белка. И каждый рецептор запаха имеет уникальную форму. Не забывайте, что млекопитающие имеют разное

число генов обонятельных рецепторов в своих геномах. Например, у нашего вида около тысячи генов, но вот работают лишь четыреста из них, а остальные шестьсот попадают в категорию псевдогенов. Итак, у нас четыреста различных по форме белков рецепторов запахов, которые вплетаются в мембраны многочисленных ресничек назального эпителия, и у всех них есть концы, «торчащие» из нервной клетки. Каждая клетка обонятельного рецептора содержит уникальный набор белков и, следовательно, уникальный набор различных форм, выходящих из клетки. Это и есть «действующий конец» белка на внешней стороне клетки, который распознает молекулу запаха. Но все еще остается вопрос: как?

Большинство биологов сразу бы ответили, что мускусный запах просто сталкивается с подходящим рецептором, с которым он взаимодействует по типу «замок — ключ» или, как иногда говорят, с помощью механизма «рука — перчатка». Как только молекула запаха попадает на рецепторный белок, изменяется трехмерная структура рецептора на конце белка, находящегося внутри клетки, что и запускает внутриклеточные реакции.

В свою очередь, биофизик Лука Турин сделал интересное и неортодоксальное предположение, что молекула одоранта (в нашем случае мускуса) действительно входит в рецепторный белок, но не меняет его структуру, а ведет себя совсем иначе. Идея Турина основана на вибрации молекул: электроны в атомах белка двигаются, и это необходимо для образования химической связи. Представьте себе химическую связь, где два атома делят один электрон. Электрон, перемещаясь от одного атома к другому, будет дергаться или вибрировать. Вибрационная теория предполагает, что молекула запаха, попадая в рецептор, изменяет вибрационные свойства белка. Это колебательное изменение переносит электрон на рецептор. Затем электрон перемещается от одного конца рецептора к другому, что становится причиной изменения вибрации рецептора. Перенос электронов или изменение частоты колебаний в конечном итоге запускает каскад действий внутри нервной клетки.

Некоторые исследователи и журналисты называют эту концепцию «теорией бесконтактной карты», противопоставляя ее более ортодоксальному механизму «замок — ключ», предпочитаемому многими учеными, занимающимися вопросами обоняния. На самом деле этой идее почти 150 лет. В 1869 году некий ученый выдвинул эту гипотезу в *Scientific American* — главном американском научно-популярном журнале того времени. Но заслуга Турина в развитии этой теории тоже неоспорима: возрождение идеи привело к разработке ряда разумных экспериментальных подходов. Результаты одних тестов подтверждают предположения, вытекающие из вибрационной гипотезы, других — нет. И, несмотря на то что все они наводят на размышления, их очень трудно интерпретировать, как отметили Лесли Вошалд и Андреас Келлер, поскольку эксперименты, подтверждающие вибрационную теорию, были оспорены. В 2015 году Эрик Блок с коллегами провел эксперименты со специфическими рецепторами — один на человеке, а второй на мыши, используя дейтериевый подход (см. вставку 6.2). Ученые взяли изотопомеры¹ мускусных запахов и проверили их на обонятельные различия. Различий обнаружено не было, а это противоречит вибрационной гипотезе.

Таким образом, вибрационная теория остается лишь интересной идеей, а вот теория «рука — перчатка», основанная на форме молекулы запаха и рецептора, кажется более аргументированной. Но независимо от того, какая теория победит — вибрационная, или соответствия формы, или, возможно, смесь обеих, — процесс при контакте запаха и рецептора один и тот же: в клетке происходит каскад взаимодействий белков, которые создают потенциал действия, возбуждая нервную систему. Этот импульс, в свою очередь, передает исходную информацию о запахе в мозг. Некоторые другие чувства имеют похожий механизм. Сам процесс на-

¹ Изотопомеры — соединения, в состав которых входит одинаковое число изотопов какого-либо химического элемента, различающихся расположением в молекуле. — *Прим. науч. ред.*

6.2 | ПРОВЕРКА ВИБРАЦИОННОЙ ТЕОРИИ

Для проверки вибрационной теории ученые разработали несколько очень толковых экспериментов. Все они основаны на использовании стабильного изотопа водорода — дейтерия, или тяжелого водорода. Ядро дейтерия состоит из протона и нейтрона, а ядро водорода содержит только протон. Химические соединения дейтерия по своим свойствам отличаются от аналогичных соединений водорода. Одно из отличий соединения, полученного при использовании дейтерия, заключается в вибрации молекулы. Заменяв дейтерий на водород в молекуле одоранта, можно значительно изменить ее вибрационные свойства, сделав молекулу с дейтерием так называемым изотопомером, по свойствам которого можно определить и свойства соединений с водородом. Размер и форма молекулы при введении дейтерия вместо водорода остаются практически прежними, а колебательные свойства изменяются¹. Если вибрационная теория верна, то вещество с дейтерием должно отличаться по запаху от вещества с водородом. А если принять за основу гипотезу формы, то оба вещества должны пахнуть одинаково, потому что формы молекул не меняются. В другом тесте надо было бы найти два запаха с одинаковыми вибрационными свойствами, но с разной формой молекул. В этом случае, если вибрационная теория верна, два вещества должны пахнуть одинаково, в отличие от теории формы, согласно которой оба вещества должны издавать разные запахи.

зывается сигнальной трансдукцией и включает в себя белковый комплекс, который я описываю в контексте другого хемосенсорного чувства — вкуса.

У вкуса гораздо меньше генов, кодирующих рецепторы в нашем геноме, чем у обоняния. У человека около четырехсот функциональных генов обонятельных рецепторов, на порядок меньше

¹ Ядро больше и тяжелее, поэтому тепловые вибрационные характеристики будут значительно меняться. К волновой функции электрона это не относится. — *Прим. науч. ред.*

вкусовых. Однако это совсем не значит, что у нас узкий диапазон различаемых вкусов. Прежде чем оценить наши способности, важно понять, как небольшие молекулы, которые производят вкус, взаимодействуют со вкусовыми рецепторами. Порой совсем не так, как запахи.

Клетки, определяющие вкус (большинство из них), представляют собой довольно сложные объекты. Их мембраны усеяны мелкими молекулами, в том числе рецепторными белками, о которых мы уже говорили. Многие из этих белков надежно закреплены в мембране с помощью различного количества петель белка, сшивающих клетку. Другой вид встроенного в мембрану белка называется ионным каналом. Этот белок полностью оправдывает свое название, транспортируя ионы (атомы с электрическими зарядами), расположенные снаружи, внутрь клетки и наоборот. Есть и другие белки, встроенные в мембрану, но они не так важны для распознавания вкуса или запаха. Внутри клетки обязательно есть ядро и другие органеллы, которые поддерживают ее работу: митохондрии, вырабатывающие энергию, и эндоплазматический ретикулум, где синтезируются белки. А еще в этих клетках есть везикулы — небольшие тела, или мешочки, которые собираются в той части, где нервный импульс передается нейрону для последующего соединения с мозгом. Везикулы переполнены нейротрансммиттерами — маленькими молекулами, являющимися неотъемлемой структурой для передачи электрических сообщений от одной клетки к другой. Эти электрические сообщения называются потенциалами действия.

В главе 4 мы обсуждали, что вкусовые рецепторы распознают пять главных вкусов: соленый, сладкий, горький, кислый и умами. Распознавание каждой категории происходит благодаря разным небольшим молекулам или даже их частям, называемым ионами. Например, в составе поваренной соли (хлорида натрия, или NaCl) два компонента: атом натрия, у которого отсутствует электрон, и атом хлора, у которого отсутствует позитрон, благодаря чему атом натрия заряжен положительно (Na^+), а атом

хлора — отрицательно (Cl^-)¹. Два иона свободно соединены посредством довольно слабой общей ионной связи. Мы чувствуем соленый вкус, когда положительно заряженный ион металла, входящий в состав соли (в случае поваренной соли это Na^+), проходит через мембрану вкусовых клеток по ионному каналу, рассмотренному выше. Когда соль, например хлорид натрия, скапливается вокруг вкусовых сосочков, их внешние клетки насыщаются ионами Na^+ . Ионы Na^+ быстро транспортируются через мембрану клетки по ионному каналу, который представляет собой небольшую порообразную «машину», перекачивающую ионы через мембрану. Когда в нервной клетке скапливается необходимое количество ионов Na^+ , происходит так называемая деполяризация, в процессе которой клетка засасывает по ионным каналам кальций. Атомы кальция² дважды положительно заряжены (Ca^{++}), и они заставляют везикулы выпустить наружу содержимое. Множество молекул (они называются нейротрансмиттерами) выходит в пространство между вкусовыми клетками и прилегающими к ним нервными клетками, называемыми синапсами. Клетка должна как бы «перезагрузиться», то есть освободиться от всех положительных ионов внутри, поэтому, как только пузырьки сделали свою работу,

¹ У натрия на внешней оболочке один электрон. У хлора — семь электронов. Любой атом стремится к завершению электронного уровня. Натрий энергетически проще отдать один электрон, чем присоединить семь, а хлору наоборот — присоединить один, чем отдать семь. Позитрона у хлора нет, у него есть недостаток одного электрона до завершения оболочки, а у натрия один электрон как бы лишний. Натрий отдает один электрон хлору, получает при этом завершенную электронную оболочку из восьми электронов и положительный заряд. Хлор получает один электрон, завершает оболочку и получает отрицательный заряд. Разнозаряженные атомы притягиваются, образуя устойчивую молекулу NaCl .

² Ионы кальция в клетках относятся ко вторичным посредникам, их концентрация возрастает внутри клетки в ответ на стимуляцию и приводит к активации определенных белков, отвечающих за ответ клетки на стимул. Для окончания аксона нервной клетки стимул — это потенциал действия, активирующийся белок — это синаптотогмин, его активация приводит к высвобождению содержимого везикул в синаптическую щель. — *Прим. науч. ред.*

ионные каналы возвращают весь калий внутрь клетки. Ионы калия (K^+) заряжены положительно, и из-за этого сбрасывается заряд¹ внутри вкусовой клетки, создавая электрический заряд, или потенциал действия, который снова побуждает нервную систему к действию. Распознавание кислого вкуса происходит аналогично соленому².

Поскольку у всех кислот есть одна общая черта — наличие в составе водорода с достаточно слабой связью, это способствует появлению ионов водорода (H^+), которые вызывают ионные изменения внутри вкусовой клетки. Если это тот же самый механизм, спросите вы, то почему кислота не дает соленого вкуса? Оказывается, ионы H^+ блокируют движение ионов K^+ по ионным каналам, а вход в клетку других положительных ионов усиливают. Следовательно, соленый и кислый вкусы создаются разными видами ионных изменений, благодаря чему мы их и различаем³. Кроме того, при присутствии соединений кислот клеточные везикулы распознают наличие другого скопления положительных ионов, и при этом освобождаются только те везикулы, которые должны реагировать на H^+ . Как и в случае с соленым вкусом, клетке нужно «перезагрузиться»: везикулы высвобождают содержимое, каналы калия очищаются, а ионы K^+ из клетки транспортируются наружу.

Носители умами, сладкого и горького вкусов не попадают в клетку, поэтому их распознавание происходит иначе, чем в слу-

¹ Изменение потенциала на мембране зависит не только от заряда иона, но и от разницы концентраций иона по обе стороны мембраны. В формальных терминах эти изменения описываются уравнением Нернста. — *Прим. науч. ред.*

² В случае описываемой ионной связи в приведенном примере с натрием и хлором между атомами с большой разницей по электроотрицательности общая электронная пара переходит преимущественно к атому с большей электроотрицательностью, в данном случае — к хлору. В результате образуется два иона — положительно заряженный ион натрия и отрицательно заряженный ион хлора. — *Прим. науч. ред.*

³ На самом деле эти изменения происходят в разных рецепторных клетках, и за счет этого мы можем различить разницу во вкусе. — *Прим. науч. ред.*

чае с соленым и кислым. Эти вещества взаимодействуют с рецепторными белками, встроенными в мембрану клетки, что очень похоже на работу обонятельных рецепторов, описанных ранее. Эти рецепторные белки вступают в контакт с комплексами так называемых G-белков (рис. 6.2), находящихся внутри клетки (см. вставку 6.3). Каскад передачи сигнала с участием G-белков также активирует высвобождение содержимого везикул.

Вибрационная теория могла бы оказаться верной для вкусовых рецепторов. Как и в случае с запахом, сама идея с вибрацией не нова: она появлялась и как гипотеза для вкуса в том же самом упомянутом ранее журнале *Scientific American* 1869 года. Последние достижения в потенциале вибрационной теории основаны на знаниях молекулярной биологии, которых просто не существовало в XIX веке. Тем не менее механизм действия ре-

6.3 | КОМПЛЕКСЫ G-БЕЛКА

Комплексы G-белка имеют три связанных друг с другом субкомпонента: альфа, бета и гамма. Этот белковый комплекс, состоящий из трех белков, соединен с имеющейся рецепторной молекулой, у которой есть два «рабочих» конца. Один конец находится снаружи клетки и может связываться с молекулой пахнущего вещества или, если речь идет о вкусе, молекулой вкусового вещества по модели «рука — перчатка». Другой конец находится внутри клетки и взаимодействует с комплексом G-белка. Как только молекула вещества с запахом или вкусом связывается с внешним «рабочим» концом рецепторного белка клетки, внутренний конец рецептора запускает реакцию, в которой субъединицы G-белка расщепляются на простой альфа-белок и сложный бета + гамма-белок. Эти два белка активируют другие белки внутри клетки для того, чтобы спровоцировать выход содержимого везикулы в синапс. Каждый из трех вкусов — сладкий, горький и умами — открывает везикулы в разных клетках, в результате чего мозг их и распознает.

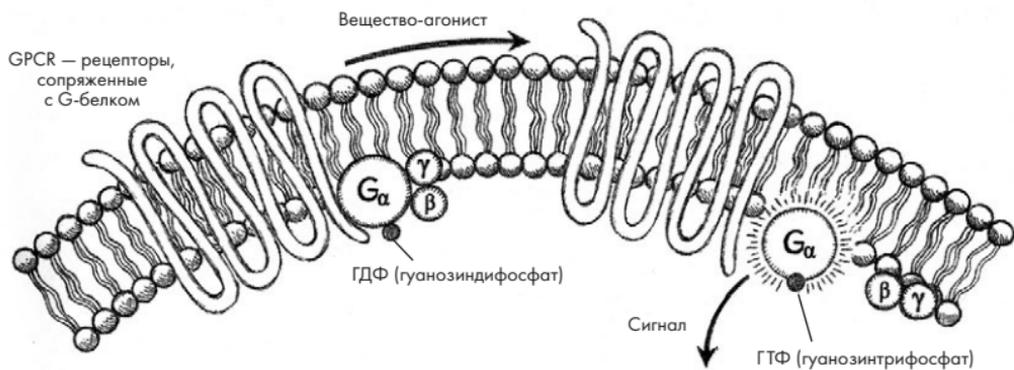


Рис. 6.2. Рецепторы, сопряженные с G-белком (GPCR). GPCR семь раз пронизывает мембрану клетки и комплексы с альфа-, бета- и гамма-белком с внутренней стороны клетки. Агонист (нейротрансмиттер) взаимодействует с белком с внешней стороны; этот процесс отрезает бета- и гамма-белки и превращает ГДФ (гуанозиндифосфат) в ГТФ (гуанозинтрифосфат), который затем запускает ответ в клетке

цепторов комплекса G-белка допускает возможность того, что некоторые рецепторы работают лучше, чем другие, и в популяции людей существует несколько вариаций рецепторов, а значит, и довольно широкий диапазон восприятия вкуса. Кроме того, количество рецепторов на языке может оказать сильное влияние на ощущение вкуса у людей.

В общем и целом большинство людей относятся к одной из трех категорий: недегустаторы, дегустаторы и супердегустаторы — в примерном процентном соотношении 25:50:25. Есть и особая категория — суперсупердегустаторы, так называемые люди с «абсолютным вкусом», и их совсем немного — менее 5%. В основном супердегустаторы — это женщины, а реже всех в эту категорию попадают люди европейского происхождения. Так кто же такие эти супердегустаторы? Можно подумать, что такие люди получают больше удовольствия от еды и напитков, но на самом деле все наоборот. Супердегустаторы более интенсивно чувствуют вкус, чем представители двух первых категорий: воздействие разных вкусов на язык у них может быть слишком сильно выражено. У суперсупердегустаторов дела обстоят еще хуже. Когда речь идет о вкусе, «больше не значит лучше».

Лучший способ описать разницу между этими категориями — объяснить, как представители каждой из них реагируют на мой любимый напиток — пиво. Для оценки вкуса пива обычно рекомендуют так называемое колесо вкуса Американского общества пивоваров (American Society of Brewing Chemists). Колесо вкуса создал один из авторов книги «Методы сенсорной оценки» (Sensory Evaluation Techniques), впервые опубликованной в 1970-е годы и пережившей уже пять изданий. Мортен Мейлгаард, специалист по чувствам и их измерению, создал колесо вкуса, чтобы придать дегустации пива количественную оценку.

Колесо вкуса нельзя назвать простым, оно претерпело много изменений с тех пор, как Мейлгаард его придумал, и фокусируется на сложности восприятия пива. Примеры из более чем ста возможных категорий включают в себя грейпфрут, карамель, скотный двор, вонючие носки, жженую резину и детскую отрыжку (надеюсь, мне не доведется попробовать последние варианты). Эти вкусы — результат влияния многих факторов, но все они исходят из очень простых составляющих пива. Кстати, для защиты этого простого состава в 1516 году немцы приняли Баварский закон о чистоте пива, или Райнхайтсгебот, запрещающий называть пивом напиток, в котором содержится что-то кроме хмеля, воды и ячменя. Дрожжи тоже необходимы в пивоварении, но пятьсот лет назад микроорганизмы явно не считались ингредиентом. Итак, современная концепция вкуса большинства классических сортов пива родилась всего лишь из четырех ингредиентов. Самый интересный аспект вкуса пива, по крайней мере для меня, формируется из хмеля и сахара, ну и, конечно же, алкоголя — продукта ферментации, вырабатываемого дрожжами из растительных сахаров.

Пиво — древний напиток, известный еще с эпохи неолита, но вот хмель используется в пивоварении всего лишь тысячу лет. За последние восемьсот лет его применение распространилось повсеместно, а в технологии пивоварения хмель окончательно закрепился после изобретения индийского пейл-эля (IPA) в начале — середине XIX века. В наше время из-за обилия на рынке

микропивоварен и крафтового пива на хмеле появилось очень много разновидностей IPA, в результате чего этот напиток приобрел огромный спектр вкусов. Интересно отметить, что изначально хмель использовался в качестве консерванта для пива, а придаваемая им горечь — это лишь побочный эффект. Сегодня хмель — основной ингредиент крафтового пива, и это приводит к появлению достаточно интересных сортов (и всеми ими я безмерно наслаждаюсь, что причисляет меня к категории обычных дегустаторов). Супердегустаторам пиво кажется слишком горьким, настолько горьким, что они избегают пить такие хмельные сорта, как IPA, да и более умеренные сорта вроде большинства лагеров вряд ли им понравятся. Лично я не чувствую жгучесть алкоголя в пиве, а супердегустатор скривится после первого же глоточка: крепкие напитки таким людям противопоказаны — даже ни-ни. Недегустаторы способны пить и есть все что угодно, поэтому к вкусу хмеля они абсолютно терпимы. Но они наверняка не смогут уловить разницу между бутылочками Columbia hopped и Cascade hopped. Супердегустаторы, скорее всего, справятся с задачей и почувствуют разницу, но, если употребление пива для них в новинку, в первую очередь они отметят только необычайную горечь этих двух сортов. А вот обычным дегустаторам достаются все оттенки хмельного вкуса. Все это не означает, что супердегустаторы и недегустаторы не могут наслаждаться алкогольными напитками. Недегустатор без проблем способен глушить текилу с халапеньо, а супердегустатор в состоянии научиться пить пиво или вино и даже получать от этого удовольствие. Есть мнение, что высококлассные шеф-повара принадлежат к супердегустаторам, натренировавшим себя преодолевать чрезмерную чувствительность вкусовых сосочков и использующим свою способность для создания новых блюд. В последнее время набирают популярность кислый эль и сезонное пиво (фермерский эль). Пивовары, изготавливающие эти сорта, рассчитывают угодить вкусовым сосочкам, отвечающим за восприятие кислоты, к которой они добавляют совсем немного хмеля. Но каждый, кто пробует по-настоящему кислый эль, отмечает конфликт вкусов:

рецепторы словно сходят с ума, не в состоянии определить, что же там преобладает — кислота или горечь. Восприятие вкуса пива — довольно простая реакция химических веществ напитка и рецепторных молекул на языке. И хотя вкус комбинаторен, единственное, что в конечном итоге определяет способности человека к дегустации, — это количество вкусовых клеток на языке. Клетки вкусовых рецепторов собраны в пучки от тридцати до ста клеток, в них содержатся белки вкусовых рецепторов. Пучки клеток называются вкусовыми почками или луковицами, и большинство из них находится на образованиях на языке, называемых сосочками.

Сосочки имеют три формы в зависимости от расположения на языке. Грибовидные сосочки облюбовали кончик языка и его среднюю часть, по внешнему виду они напоминают маленькие грибы, возвышающиеся над поверхностью, и содержат до двух вкусовых почек каждый. Желобовидные сосочки расположены ближе к корню языка, а листовидные сосочки — по его бокам. На нёбе и в горле тоже есть вкусовые сосочки. Их даже нашли в легких, но их функция в этой ткани неизвестна.

Плотность сосочков на языке напрямую коррелирует со способностями человека воспринимать вкус: у супердегустаторов — более тридцати штук на 100 мм^2 , у дегустаторов — от пятнадцати до тридцати на 100 мм^2 , а у недегустаторов — менее пятнадцати на 100 мм^2 . Число сосочков в данном случае зависит не от генетики, а от основного процесса развития. Недавно было расшифровано, как именно сосочки появляются на языке, и сейчас идет проверка интересных гипотез о том, как во время развития определяются расположение и количество сосочков. В процессе этой работы выявился странный факт: зубы и сосочки имеют сходные гены.

Как же можно узнать количество вкусовых сосочков на определенной области языка? Все способы связаны с окрашиванием сосочков, и самый приятный из них — прополоскать рот красным вином. Если сделать это правильно, можно разглядеть на языке небольшие шишечки, это и есть сосочки. Затем возьмите лист из записной книжки со сменными блоками, оснащенной кольцевым

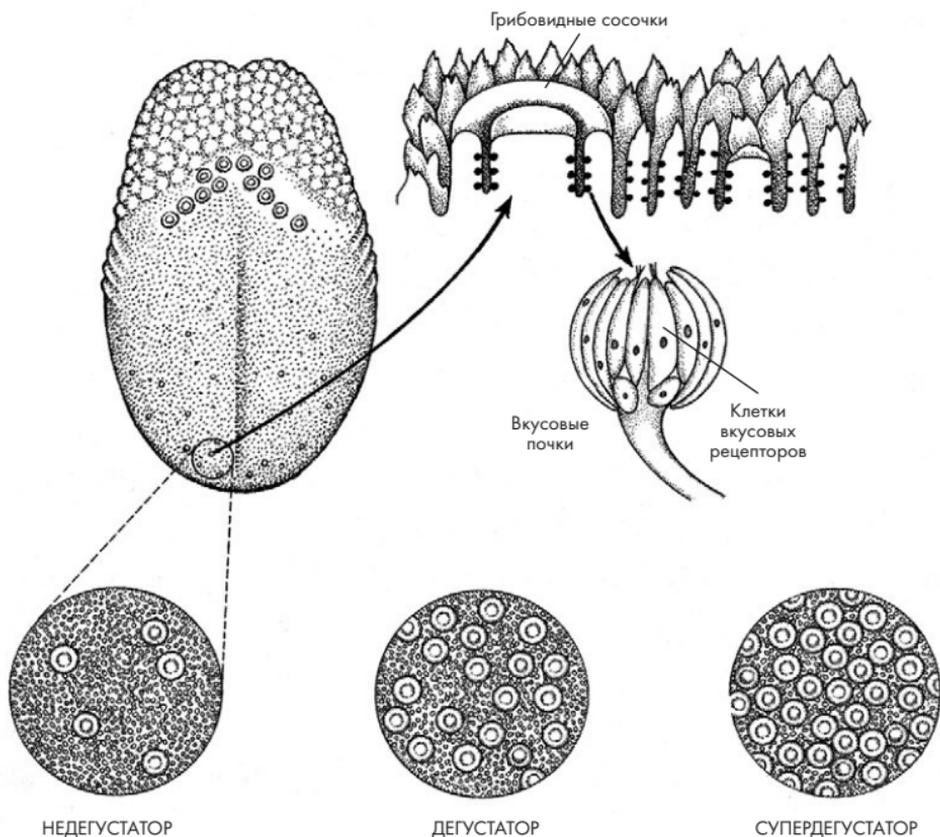


Рис. 6.3. Сосочки языка и типы людей по принципу восприятия вкуса

механизмом: пробитые в бумаге отверстия имеют диаметр около 6 миллиметров. Оторвите кусочек с отверстием и положите на язык. Теперь просто подсчитайте количество сосочков, которые вы видите в пробитом отверстии. Если получилось меньше четырех, то вы, скорее всего, недегустатор. От четырех до восьми сосочков означает принадлежность к дегустаторам. Если же их больше восьми, то вы, вероятно, супердегустатор или даже супер-супердегустатор (рис. 6.3).

Хотите верить, хотите нет, восприятие вкуса очень похоже на восприятие боли. Фактически один из лучших способов описать, как работают болевые рецепторы, — это взглянуть на вкусы, вызывающие болевые ощущения, такие как очень острая и пряная еда.

Он плескался в пиве, он купался в шоколаде (кажется, молочном), он резвился в пюре из полутора тысяч печенюшек Oreo,

но последняя его ванна — это просто нечто. Кемре Кандар, интернет-сенсация (что бы это ни было, что бы это ни значило), набрал более пятнадцати миллионов просмотров, демонстрируя свои трюки на YouTube. А его «подвиг» в 2016 году в первую же неделю побил все рекорды: два миллиона зрителей прильнули к мониторам, чтобы взглянуть на живое воплощение мема «Слабоумие и отвага». Кандар вылил в ванну тысячу двести пятьдесят бутылочек острого соуса, щедрой рукой добавил туда же перцы чили и с головой погрузился в эту адскую смесь. Не делайте так никто и никогда: даже смотреть на это мучительно больно.

Кемре Кандар — поистине странный человек, и это купание в остром соусе было, по его признанию, весьма и весьма болезненным. А почему? Это же просто жидкость, не так ли? Но острый соус и перец чили, хоть и состоят из большого количества воды и солей, еще содержат молекулу под названием капсаицин. Это химическое вещество, обнаруженное во многих видах перцев, реагирует с определенными клетками нашего организма, трансдуцируя их. Именно количество капсаицина в перце определяет, насколько острым будет соус. Существует и единица измерения остроты перца, она называется единицей шкалы Сковилла (ЕШС). Для определения жгучести используется спиртовая вытяжка из перца, раствор которой предлагают протестировать группе экспертов: концентрацию экстракта постепенно снижают, разбавляя тот подслащенной водой до тех пор, пока большинство членов группы не перестают чувствовать остроту. Концентрация, при которой жгучесть уже не ощущается, и называется уровнем жгучести. Продемонстрируем шкалу жгучести на примере перца халапеньо. Это же очень острый перец, правда? Каждый подтвердит. А знаете перец, который называется «Каролинский жнец»? Честно говоря, лучше с ним и не знакомиться. У обычного халапеньо рейтинг по шкале Сковилла составляет 2500 ЕШС, а у «Каролинского жнеца», самого острого из всех известных перцев, — 2 500 000 ЕШС. В тысячу раз больше! По видео трудно судить, но вроде бы Кемре Кандар наполнил ванну соусом табаско и украсил стручками красного перца чили. Соус табаско (он бы-

вает разных видов) имеет рейтинг примерно 5000 ЕШС, перец чили — тоже около того. Если бы блогер взял что-то вроде соуса Blair's 16 Million Reserve, ванна получилась бы очень дорогой (это элитный продукт) и жутко жгучей — содержимое бутылочки оценивается в 16 миллионов ЕШС. А ведь даже с относительно мягким табаско и красным чили концентрация капсаицина в ванне Кандара была приличной. Так что же происходило с телом отважного безумца при медленном погружении в адскую смесь?

Когда Кандар залез в ванну, молекулы капсаицина ринулись в атаку. Кожа имеет все виды клеток, уже упомянутые при рассмотрении тактильных ощущений, но в некоторых клетках есть транзиторный рецепторный белок (TRP), встроенный в мембрану (тот, что сильно пострадал от ванны острого соуса, называется TRPV1). Этот белок немного похож на белки хеморецепторов, которые обсуждались ранее, только он вплетается в мембрану, проходя через нее не семь раз, как другие хеморецепторы, а шесть. Однако главное отличие в том, что у TRP нет двух концов, расположенных внутри и снаружи клетки, как у обонятельного рецептора, и он для своего функционирования создает в мембране канал с шестью трансмембранными доменами.

Этот канал активируют высокая температура, низкий рН (кислая среда) и небольшие молекулы вроде капсаицина. Аллил-изотиоционат — органическое вещество, входящее в состав острой горчицы и васаби, — также участвует в активации. Каждый из этих факторов раздражает кожу и открывает канал так, что образующееся отверстие может затем регулировать внеклеточную концентрацию Ca^{++} и Na^{+} (и их внутриклеточные эквиваленты). Не вдаваясь слишком глубоко в нейрохимию, можно сказать, что эта химическая регуляция влияет на регуляцию напряжения и лежит в основе потенциала действия, который затем посылает информацию в мозг через нервную систему. В случае с Кемре Кандаром капсаицин попал в каналы TRPV1 и широко открыл их, заставляя клетку перемещать ионы Ca^{++} туда-сюда, чтобы регулировать концентрацию этой молекулы. Это вызвало регуляцию напряжения в клетке, которая затем передалась через

нервную систему Кандара в виде потенциала действия к мозгу, и реакцией мозга было чувство боли. Чем глубже блогер погружался в адскую смесь, тем больше его клеток открывали свои каналы TRPV1 и тем больше потенциала действия устремлялось к его мозгу, чтобы вызвать болевую реакцию. И да, он осознал, что весь горит, потому что каналы TRPV1 передали и это сообщение в мозг. В этой красной слизи невозможно разглядеть, как Кемре Кандар потел, но он наверняка делал это, и весьма обильно, потому как хорошо известно, что физиологической реакцией на перевозбуждение каналов TRPV1 капсаицином становится потоотделение. Чувство боли в данном конкретном случае было вызвано глупым пристрастием парня к экстриму, а ведь болевая реакция — это защита организма: встречаются прискорбные случаи, когда потеря ощущения боли приводит к пагубным последствиям.

В 2006 году ученых-медиков заинтересовал поразительный случай: при обследовании у шести детей из Пакистана обнаружили очень странные многочисленные травмы — зажившие и свежие. Не все дети были родственниками: трое были из одной семьи, двое — из другой, один — из третьей. При получении всех этих травм дети ни разу не пожаловались на боль. У некоторых не было кончиков языков — они откусили их в раннем детстве, даже не пикнув. Старшие дети научились притворяться, что им больно, если их травмы выглядели особенно ужасно. Почти у каждого была как минимум одна конечность со сросшимся переломом, о котором родители даже не подозревали. Эти удивительные дети просто не чувствовали боли. А ведь они ощущали прикосновения, реагировали на температуру и боялись щекотки. Ученые предположили, что все же корень проблемы зарыт в семье. А так как дети не воспринимали только боль, появилась гипотеза, что у них не функционирует рецептор определенного вида. По семейному анамнезу и образцам ДНК родственников Джеймс Кокс и его коллеги смогли сопоставить потерю болевого рецептора с определенной локацией на хромосоме 2. Затем они клонировали большую часть области генома, где было локализовано поражение, и исследовали ее на наличие генов, которые могут быть связаны

с неврологической функцией в целом и болевым восприятием в частности. Они сосредоточились на гене под названием SCN9A, который кодирует натриевый канал в нервной системе, и правильно сделали. Когда Кокс и его коллеги изучили ген SCN9A у всех шести детей, они обнаружили не одну-единственную мутацию, ответственную за отсутствие боли, а целых три разных генетических изменения в трех разных семьях, продуцировавших усеченные гены. Эти гены были фактически нефункциональны и приводили к отсутствию функциональных натриевых каналов болевого рецептора у детей.

За десятилетие, прошедшее после этого исследования, была проделана большая работа по генетике болевых рецепторов у человека. Нарушение нормального восприятия боли и передачи ее в мозг оказалось чрезвычайно сложным явлением. При аномальном восприятии боли нарушаются многие функции клеток, включая пути, участвующие в регуляции серотонина, эстрогена, ГАМК, глутамина и катехоламина. Кроме того, в развитии участвуют факторы роста и другие важные белки. Создается впечатление, что существует много типов боли, которые опосредованы различными хеморецептивными и ионными канальными механизмами.

ГДЕ Я?

Пределы слуха и равновесия человека

Что для одного — крик, для другого — писк; что для одного — музыка, для другого — невыносимый шум.

Генри Роллинз, музыкант

Любой, кто хоть раз испытывал тяжелое похмелье после бурно проведенной ночи, знает, каково это, когда все плывет, кружится и качается перед глазами. В мае 2006 года четверо техногиков в течение четырнадцати часов обсуждали этот феномен в чате, наперебой предлагая «лекарства» от этого недуга. Вот один гэг оттуда: «Единственное, что я могу вам посоветовать, — это забиться в угол комнаты и изо всех сил держаться за стены. Затем позвоните предкам и скажите им, что мир на самом деле вращается вокруг вас». Перебор с алкоголем — дело нешуточное, но на этом примере легко объяснить, как работает равновесие у человека. В главе 5 я описывал строение внутреннего уха. Часть этой структуры необходима для слуха, но полукружные каналы внутреннего уха предназначены для равновесия.

Полукружные каналы формируют своего рода трехмерную систему координат с осями X–Y–Z, известную как вестибулярный аппарат. Все три полукружных канала заканчиваются ампулами, и в этой области они сходятся вместе. Сами каналы заполнены жидкостью — эндолимфой. Внутри каждая из трех ампул заполнена желеобразной ячеистой структурой. Это купула, на которой расположены небольшие реснички, или волоски, отходящие от

ее поверхности. Эти реснички снабжены нервами и соединены с мозгом. Если вы поворачиваете голову, жидкость смещается под действием инерции, вызванной поворотом головы. Каждая купула, как поплавок на удочке, движется в обратном направлении, чуть запаздывая, что вызывает изгиб ресничек в ампуле. Сгибание волосков вызывает потенциал действия в каналах, который передается в мозг, где информация интерпретируется, чтобы помочь нам удержать равновесие. Однако равновесие — это не только то, где в пространстве находится наша голова.

Вокруг нас постоянно какое-то движение, да и мы сами движемся. Даже то, как мы воспринимаем свое положение в пространстве, включает в себя хаотичное движение — броуновское движение жидкости в полукружных каналах. Если бы все это броуновское движение распознавалось вестибулярным аппаратом, с равновесием была бы полная неразбериха: мозг бы просто задымился от перегрузки, получая столько ложной информации. Меес Мюллер с коллегами разработал модель для изучения того, как полукружные каналы справляются с воздействием броуновского движения. Эта модель рассматривает несколько особенностей строения волосковых клеток купулы. Стоит отметить, что волоски этих клеток в десять раз длиннее, чем волоски в слуховой системе, в десять раз более упруги (кохлеарные волоски слуховой системы сгибаются намного легче) и в сто раз труднее смещаются, чем кохлеарные волоски. Благодаря волосковым клеткам купулы эта странная система с трехосным вестибулярным аппаратом позволяет справиться с броуновским движением и сохранить равновесие (рис. 7.1).

Вся информация из полукружных каналов отправляется в мозг и объединяется с информацией из трех других источников — глаз, мышц и суставов¹. Информация из всех трех органов чувств передается в ствол головного мозга, где интерпретируется,

¹ Информация от мышц, связок, суставных сумок называется проприоцептивной чувствительностью и позволяет ощущать относительное положение частей тела и их движение. — *Прим. науч. ред.*

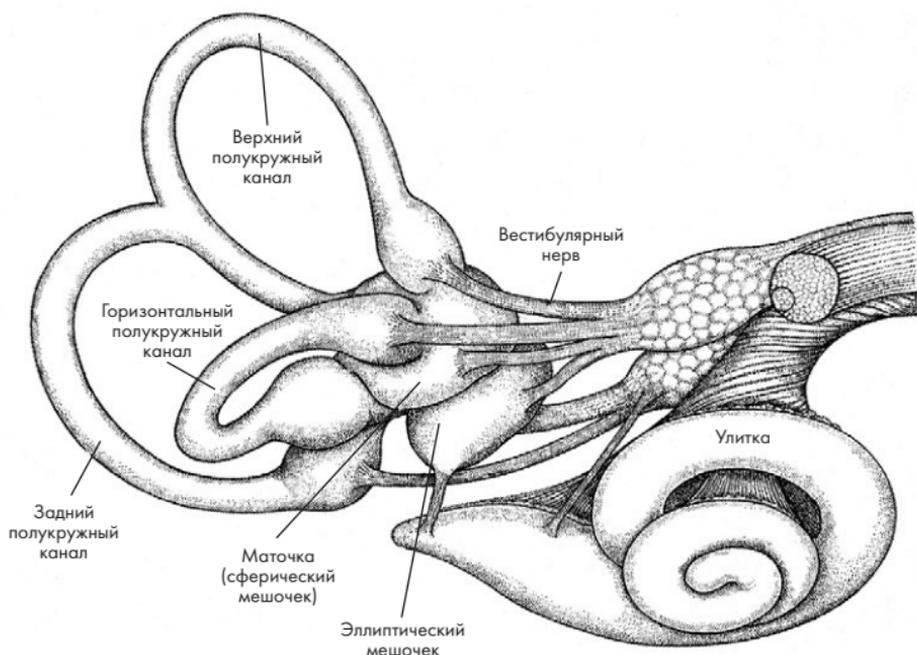


Рис. 7.1. Строение внутреннего уха. Органы равновесия — слева, а слуховой аппарат — справа

взаимодействуя с мозжечком и корой головного мозга. Эти две области мозга важны, потому что позволяют остальной части тела реагировать на первоначальное движение, из-за которого возникла потребность в равновесии. Мозжечок играет важную роль, поскольку координирует сложные движения тела, а кора головного мозга — потому что предоставляет информацию из памяти и усвоенного опыта для того, чтобы «устранить крен».

Фигуристы лучше всех держат равновесие. Их пируэты — самый сложный вызов вестибулярному аппарату, но спортсмены справляются с нагрузкой. Как только фигурист начинает вращаться в какую-то сторону, купула быстро смещается в противоположном направлении из-за инерционных свойств эндолимфы. Реснички купулы, или волоски, сгибаются, указывая мозгу, что голова движется в направлении вращения. Но по мере увеличения количества оборотов (примерно через десять секунд) жидкость в каналах полностью увлекается окружением, и чувствительность к этому вращению исчезает. Даже при таких экстремальных возмущениях купулы, как во время исполнения

классических элементов — винта, бильмана, волчка, либелы или заклона, фигуристы грациозно выходят из вращения. В 2006 году Наталья Канунникова установила мировой рекорд по вращению стоя — 308 оборотов в минуту! — после чего заскользила по льду как ни в чем не бывало.

Как же фигуристы, такие как Канунникова, сохраняют равновесие и справляются с головокружением? Отчасти это врожденные способности, поэтому и великим спортсменом стать не так-то уж просто. Но конечно же, есть и уловки, помогающие преодолеть причуды вестибулярного аппарата. Одна из хитростей при вращении — постановка ног и, следовательно, расположение центральной оси, вдоль которой вращается фигурист. Если четко держать эту ось в стабильно вертикальном положении, зафиксировав на ней центр тяжести, тело будет сохранять равновесие. Конечно, для совершенствования техники требуются годы практики, но это того стоит. Есть еще один трюк — сверхбыстрое вращение надо выполнять в конце программы. Если фигурист ставит эффектную точку в выступлении, заканчивая вращение в стабильной (но драматичной) позе, восстановить равновесие ему сильно проще. Другой фокус состоит в том, чтобы выйти из вращения, войдя в широкую дугу, во время которой можно восстановить даже пошатнувшийся баланс. Дугу часто считают движением поэтичным и артистичным, а на самом деле это средство выживания, которое фигурист использует, чтобы оставаться в равновесии.

А вот за похмелье и «танцующие» стены ответственен этанол. Если ночь удалась и алкоголя было выпито больше, чем печень может детоксицировать, этанол остается в кровотоке и путешествует по всему организму. Одно из мест, где он скапливается в довольно ощутимом для физиологии количестве, — внутреннее ухо, и особенно полукружные каналы. Купула полукружного канала не привыкла к этаноловым ваннам и после подобного купания искажает свою форму, из-за чего реснички остаются в постоянном контакте со сторонами ампул. Затем связанные с купулами нервные клетки посылают импульс в мозг, сигнализируя о неполадках с равновесием, и тот реагирует, пытаясь компенсировать

ошибочную информацию. В частности, мозг запускает вращение зрительной системы — вот откуда «вертолетики» перед глазами. Пьяный человек может просто заснуть, не испытывая какого-то дискомфорта. Во время сна этанол испарится¹ и купулы восстановят первоначальную форму. Но после пробуждения человек может обнаружить, что комната все еще вращается. Это вращение — результат «памяти» мозга: он воспроизводит ошибочную информацию прошлой ночи и снова заставляет зрительную систему вращаться, чтобы компенсировать это воспоминание.

Все супергерои и крутые парни обладают идеальным чувством баланса. Разве обычный человек может сравниться с ними? Неуклюжий чудак — персонаж многих забавных историй, из которых складывается наше представление о человеческих возможностях. Один из самых известных случаев супербаланса связан с индейцами-скайуокерами (см. вставку 7.1).

По данным Национального института глухоты и других коммуникативных расстройств, входящего в состав Национальных институтов здоровья, многие медицинские аномалии коренятся в вестибулярном аппарате. Головокружение, к примеру, весьма неприятное состояние. Оно может быть вызвано несколькими анатомическими и физиологическими дисфункциями и носит несколько названий. Два наиболее распространенных расстройства, которые приводят к головокружению, — доброкачественное позиционное пароксизмальное головокружение (BPPV) и синдром Меньера. Многие проблемы вестибулярного аппарата связаны со слуховой системой, поскольку эти структуры расположены рядом. При BPPV отолиты, находящиеся в слуховом аппарате, выходят из мешочка внутреннего уха и попадают в полукружные каналы. Эти похожие на камешки мелкие частицы важны для равновесия, но в полукружных каналах они давят на купулу. Если купула не компенсирует это давление, то реснички остаются загнутыми, а нервные клетки внутреннего уха вынуждены посылать в мозг ложную

¹ Большая часть этанола не испаряется, а активно метаболизируется организмом. — *Прим. науч. ред.*

7.1 | СКАЙУОКЕРЫ?

Есть много историй о представителях различных этнических групп, демонстрирующих чудеса равновесия. Могавки — индейцы из Лиги ирокезов — долгое время считались крутыми специалистами по балансу и благодаря такой репутации легко находили себе работу на высоте, на строительных площадках небоскребов к примеру, за что и получили прозвище — скайуокеры¹. В Нью-Йорке действительно почти 10% монтажников-высотников на небоскребах — выходцы из племени ирокезов. Но вся история о суперспособностях этих людей всего лишь миф. Могавки Канаваке (это маленькое индейское государство-резервация в Канаде), которые считались первыми скайуокерами, жили в конце 1880-х годов неподалеку от строящегося железнодорожного моста. Компания, занимающаяся строительством, наняла нескольких мужчин-могавков для работы на мосту, и там они показали себя с лучшей стороны, — казалось, что они совсем не боятся высоты. А потом выяснилось, что все совсем наоборот: они очень боялись, но никак не показывали свой страх. Это было бы ниже их достоинства, ведь полное презрение к опасности — часть их культуры. Для могавков карьера скайуокера была и остается сродни пути воина, поэтому эта традиция и укоренилась в устое племени. На самом же деле скайуокеры держат равновесие ничуть не лучше, чем другие люди.

информацию о положении головы. И конечно же мозг будет пытаться компенсировать ошибочные сведения, настраивая зрительную систему. Причина синдрома Меньера, или лабиринтного головокружения, до конца не выяснена, но известно, что она связана с изменением объема эндолимфы — жидкости, которой заполнены каналы.

¹ Скайуокер (от англ. *Skywalker*) — «ходящий по небу». Персонаж «Звездных войн» Люк Скайуокер не был связан с индейцами, а унаследовал фамилию от бабушки Шми Скайуокер.

Лабиринтит (внутренний отит) и вестибулярный нейронит могут быть вызваны вирусными инфекциями. Лабиринтит вызывает отек части внутреннего уха и приводит к потере равновесия, потому что воспаление меняет положение купул в ампулах. Вестибулярный нейронит — это воспаление вестибулярного нерва, препятствующее передаче в мозг корректной информации о положении тела, поступающей из купул. А расстройство, известное как перилимфатическая фистула, может быть последствием травмы головы, как и ВРРВ. Травма головы при перилимфатической фистуле заставляет жидкость из среднего уха просачиваться в полукружные каналы, что нарушает положение купул и приводит к потере равновесия и головокружению. Есть еще один известный синдром — *mal de debarquement*¹, с которым знакомы все, кто был в морских круизах. Этот синдром укачивания обычно проявляется после продолжительного пребывания на корабле. По-видимому, вестибулярная система, компенсирующая качку во время плавания, продолжает это делать и после высадки на берег.

В рамках Национального исследования здоровья и питания (NHANES) чувство равновесия изучили в соответствии с этническими и возрастными группами. Осмотры населения начались в 1960-х годах и регулярно проводятся в США с 1999 года, благодаря чему выявились тенденции в таких вопросах здравоохранения, как анемия, сердечно-сосудистые заболевания, диабет, воздействие окружающей среды, болезни глаз, потеря слуха, инфекционные заболевания, болезни почек, питание и ожирение. С 2001 по 2004 год в рамках NHANES изучали вестибулярные дисфункции в надежде понять, чем обусловлена потеря равновесия у людей пожилого возраста и представителей некоторых этнических групп. Ведь чувство равновесия — важный аспект здоровья человека, и потеря его ведет к падениям и травмам, которые могут стать смертельными.

¹ Дословно в переводе с французского означает «болезнь того, кто сошел на берег», синдром укачивания, проявляющийся после длительного морского круиза или авиаперелета.

При осмотре NHANES использовался стандартизированный тест, так называемый тест Ромберга, позволяющий выявить нарушения в функциях вестибулярного аппарата при помощи определенных поз. У теста Ромберга есть подтвержденные недостатки, но все же он может многое сказать о чувстве равновесия индивида. Тест очень простой. Испытуемого просят встать прямо, а затем закрыть глаза. Если испытуемый падает, то результат теста положительный. В 1846 году, когда Фридрих Ромберг разработал этот тест, положительный результат был признаком поражения нервной системы. Но падения опасны для здоровья человека, и по прошествии времени тест немного изменили: первоначальный вариант модифицировался в тот, который теперь полиция предлагает подозреваемым, пытаясь определить их состояние опьянения.

Исследование NHANES показало, что нет никаких «избранных» этнических групп с чувством равновесия, развитым лучше, чем у других. Никак с этой точки зрения не отличаются и представители разных полов, курильщики и некурящие, люди с гипертонией и без нее. Как ни странно, люди со средним образованием набрали на 40% больше баллов по тесту Ромберга, чем люди без дипломов. Кроме того, диабетики показали результаты на 70% хуже, чем люди, незнакомые с этим заболеванием, поэтому им диагностировали вестибулярную дисфункцию. Можно предположить, что обладатели дипломов в среднем читают больше, да и диабет, как известно, вызывает проблемы с глазами. Так, вероятно, эти два коррелята — диплом и диабет — объясняются каким-то феноменом зрения? Только вот установление причинно-следственных связей — это совсем другая история.

Как показало исследование, вестибулярная дисфункция прогрессирует с возрастом, причем нелинейно. Люди от пятидесяти до пятидесяти девяти лет в два раза чаще молодых проваливают тест на равновесие, а вот те, кому за восемьдесят, — уже в двадцать пять раз. И тогда совсем неудивительно, что выявляется корреляция между провалом теста Ромберга и падениями. На деле у нас все не так плохо с чувством баланса, да к тому же этот навык можно натренировать. Но к сожалению, с возрастом мы

теряем и хватку, и равновесие: вероятно, со временем наш вестибулярный аппарат просто изнашивается.

При старении организма неизбежно ухудшается и слух, но у всех это проявляется по-разному. Слуховое восприятие начинается с уха: звуковые волны вначале попадают во внешнее ухо, а затем проходят в среднее ухо и внутреннее. Строение среднего и внутреннего уха предназначено для распознавания определенных характеристик звуковых волн и передачи их в мозг, где те интерпретируются и воспринимаются как разные звуки.

Все волны имеют две основные физические характеристики: высоту, или амплитуду, и частоту. Понаблюдайте за волнами в океане или собственной ванне: чем сильнее воздействие Луны, тем выше прилив; чем сильнее вы толкаете воду, тем выше волна, то есть амплитуда. Затем приглядитесь: волна за волной накатывают на берег... С какой периодичностью? Эта характеристика зависит от частоты, с которой генерировалась волна. Чем ближе друг к другу гребни волн, тем выше частота. Если волны идут медленно — частота низкая. Те же принципы применимы и к звуковой волне, разве что вместо воды там вытесненный воздух.

Чтобы понять, как наши уши воспринимают звук, нужно рассмотреть три его характеристики: интенсивность, высоту и тон. Интенсивность связана с амплитудой, или высотой волны, а высота — с частотой волны. Вопрос тона немного сложнее. Большинство источников не издают чистых звуков, это означает, что от одного источника исходят волны разных частот. Тон как раз связан с чистотой источника: к примеру, если все три инструмента в музыкальной группе имеют одинаковую высоту или частоту, тон звука будет более чистым. Группа, издающая звуки с разной частотой, по звучанию будет сильно отличаться от группы с более равномерным тоном. Обратите внимание, я избегаю оценочных суждений и не утверждаю, что какой-то из двух тонов — чистый (три инструмента играют на одной частоте) или смешанный (три разные частоты) — приятнее, чем другой. Мозг каждого человека интерпретирует тона по-своему: один наслаждается какофонией звуков, другой такое на дух не переносит.

Диапазон слуха человека насчитывает четыре порядка герц (20 Гц — 20 000 Гц; см. вставку 1.3), но лучше всего мы слышим в диапазоне от 1000 до 4000 Гц (рис. 7.2). Звуки с этой частотой относительно высокие. В этом диапазоне поют на сцене и толкают речи с трибун, но другие звуки, которые мы обрабатываем, все же находятся за его пределами.

Когда Мэрайя Кэри в свистковом регистре заканчивает песню *Emotions*, она берет ноту соль четвертой октавы (G7) на частоте 3135,96 Гц. Даются ей и низкие ноты в 82,41 Гц. Чтобы было лучше понятно, поясню: тот раздражающий звук тестового сигнала, который ежемесячно можно услышать, когда радиостанции запускают проверку системы аварийного оповещения, и который может разбудить даже мертвого, составляет ровно 1000 Гц. В нижней части нашего диапазона, на 20 Гц, мы слышим вибрирующие звуки, такие как гудение ветра, прорывающегося через приоткрытое окно ускоряющегося автомобиля. Наверху, на отметке 20 000 Гц, расположились странные, пронзительные звуки, напоминающие тонкий свист. Мэрайя Кэри хоть и впечатляет, но все же далека от таких рекордов, зато она — живое воплощение человеческих возможностей по высоте тона: диапазон ее голоса — целых пять октав!

В некоторых культурах певцы могут выходить за пределы привычного музыкального звукоряда. Вы слышали, к примеру, тувинское горловое пение? Это поразительно: их вокализация

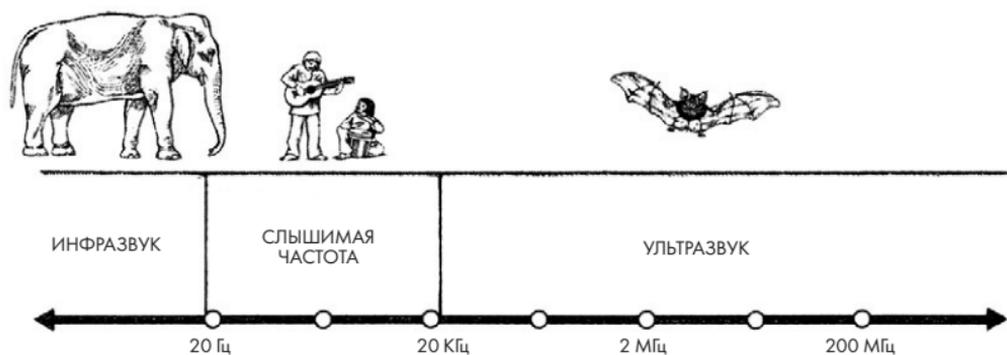


Рис. 7.2. Диапазон звуков в Гц, включая частоты, воспринимаемые человеком

7.2 | ВЫСОТА ЗВУКА И ЗВУКОРЯД

Высота звука измеряется в герцах, но музыканты для ее записи используют ноты. В диатонической музыкальной гамме семь нот: до, ре, ми, фа, соль, ля, си, а дальше снова до. Традиционное нотное обозначение соотносится с буквенной нотацией — от А до G. Каждый набор из восьми нот — до, ре, ми, фа, соль, ля, си, до (C, D, E, F, G, A, B, C) — составляет октаву. Самая высокая октава на пианино с восьмьюдесятью восьмью клавишами имеет номер 8, а самая низкая — 0. Всего на фортепиано представлено восемь¹ октав. И это обусловлено тем, что там есть только одна нота октавы 8 и три ноты октавы 0. Существуют ноты, которые находятся за пределами диапазона, который можно сыграть на классическом фортепиано. Частота самой низкой используемой музыкальной ноты C-1² составляет всего 8,176 Гц, тогда как самая высокая нота C7 составляет 2093 Гц. Обратите внимание, что эта самая высокая нота значительно ниже той, что берет Мэрайя Кэри в песне *Emotions*. Есть интересный аспект нот и их частот, который вы, возможно, заметили или уже знаете. Если частота самой низкой ноты (C-1) равна 8,176 Гц, а самой высокой ноты (C7) — 2093 Гц, то шкала не может быть линейной (попробуйте разделить 2093 на 8,176, и вы не получите восемь октав). Это связано с тем, что, когда музыканты играют звуки, относящиеся к октавам от 0 до 1, они удваивают частоту (значение в герцах). Так, нота C-1 составляет 8,176 Гц, а C0 — 16,352 Гц и так далее. Это означает, что даже если музыканты используют эти восемь октав, то возможно существование и более высокой октавы, чем 8, и более низкой, чем 0 (обозначенные со знаком минус).

¹ Точнее, семь полных октав и четыре дополнительные клавиши; от ля субконтроктавы (A0) до ноты до 5-й октавы (C5). — *Прим. науч. ред.*

² Стандартом MIDI (цифровой интерфейс музыкальных инструментов) в качестве употребляемых в музыкальных произведениях нот определен другой интервал — с ноты до субсубконтроктавы (C-1, 8,1758 Гц) до ноты си 9-й октавы (G9, 12,544 Гц). — *Прим. науч. ред.*

находится в самой низкой части шкалы диапазона человека, а он ведь не такой уж и маленький. Немного удивительных фактов. Самая низкая нота — это семь октав ниже нуля¹, В-7, какие-то ничтожные 0,189 Гц. А самая высокая... нет, это не Мэрайя Кэри с ее феноменальной нотой G7, это Джорджия Браун, бразильская певица, которая легко выдает G10, или 25 088 Гц, и это далеко за пределами нашего слухового восприятия. Диапазон Браун — восемь октав: от G7 к G10, или от 3135 до 25 088 Гц. Но и это не предел голосовых масштабов. Американец Тим Стормс способен взять ноты десяти октав от G-5 до G5 (0,7973–807,3 Гц). Стормс — человек, издавший самую низкую ноту, когда-либо записанную (G-5). Большинство людей даже не слышит подобных звуков, ведь те находятся на крайних пределах нормального диапазона слуха.

С возрастом слух, как и равновесие, ухудшается из-за «износа» механизма, воспринимающего звуки. Не обошлось в слуховом процессе и без крошечных волосков — ресничек. Когда человек стареет, некоторые реснички обламываются и становятся нефункциональными. С подобной проблемой столкнулся и я: после многих лет совместной жизни я перестал слышать свою жену так же хорошо, как во время наших первых встреч (это моя версия событий, и я ее придерживаюсь). И я предпочитаю думать, что во всем виноват ее слишком уж высокий голос, а не недостаток внимания с моей стороны.

Как наши уши воспринимают амплитуду волны? Высота волны может быть автоматически преобразована в ее мощность. Чем сильнее звук, тем легче его распознать. Таким образом, механические датчики у нас в ушах должны обнаруживать не только пики звуковых волн, но и мощность, которую те генерируют. И они делают это, измеряя, сколько механических частей внутреннего уха смещено. Эта величина как раз и передается в мозг, который интерпретирует ее как интенсивность.

¹ За условный ноль в научной нотации приняты ноты субконтроктавы — нижней слышимой человеком октавы. — *Прим. науч. ред.*

Интенсивность звука измеряется в децибелах, которые являются относительной безразмерной величиной, характеризующей мощность на единицу площади, попадающую в наше внутреннее ухо. По мере увеличения расстояния от источника звука до уха мощность уменьшается в логарифмической зависимости — единица на квадрат относительно дистанции перемещения. То есть если звук возникает на расстоянии 1 метр, он будет иметь относительный эффект единицы. А если мы отойдем на 4 метра и повторим тот же звук, то его мощность составит одну шестнадцатую от интенсивности первоначального звука, изданного на расстоянии 1 метр. Если вначале звук был 160 децибелов на расстоянии 30 см, то на расстоянии 1,2 метра он будет иметь уровень в одну шестнадцатую от того значения, то есть 10 децибелов. В отличие от частоты интенсивность имеет порог слышимости, установленный на ноль децибелов, при котором волны, генерируемые звуком, не имеют мощности. Шепот, который мы улавливаем барабанными перепонками, находится в диапазоне 20 дБ, а звуковые волны, попадающие при этом в наши уши, способны сместить частицы в воздухе на 10^{-4} миллиметра, или 0,0001 миллиметра. Обычный разговор на уровне около 60 дБ¹ производит звуковые волны, способные сместить частицы в воздухе на 10 миллиметров.

На спортивных мероприятиях не только фиксируются лучшие показатели выступающих спортсменов, но и порой ставятся рекорды по шуму, производимому болельщиками. Самое громкое зарегистрированное неистовство фанатов в крытом помещении достигло уровня в 126 дБ, это произошло на домашней баскетбольной площадке команды «Сакраменто Кингз». Даже если разговор идет на повышенных тонах, подобный рев трибун будет мощнее его примерно в четыре миллиона раз. А самым громким стадионом в мире считается «Тюрк Телеком Арена» в Стамбуле, где базируется футбольный клуб «Галатасарай». Тамошние фанаты обычно поднимают шум в 131 дБ — сила такого звука почти

¹ Надо понимать, что 60 дБ — это в 10 000 раз больше, чем 20 дБ. 60 дБ — законодательно разрешенный уровень шума в офисе.

на грани с болевым порогом человека. «Тюрк Телеком Арена» — частично крытый стадион, и весьма удивительно, что американцы сумели переорать турок на полностью открытой площадке. В 2014 году рев трибун на стадионе «Эрроухед» в Канзас-Сити, штат Миссури, достиг ушеразрывающего уровня — 142,2 дБ! Этот звук превышает болевой порог и сравним с грохотом реактивного двигателя, если встать в 3 метрах от того без шумопоглощающих наушников. Даже на рок-концертах не бывает такой громкости — хоть вруби все усилители до одиннадцати (а ведь Найджел Туфнел из легендарной группы *Spinal Tap* ясно заявил: «Одиннадцать — это еще на один громче»¹).

Нас окружает море звуков. Звуковые волны повсюду, и наши уши постоянно настороже — ведь и среднее ухо, и внутреннее предназначены именно для их восприятия. Наружное ухо, эта кожно-хрящевая структура, действует как воронка, улавливающая звук и направляющая его во внутреннюю часть слухового аппарата, а именно в трубчатый канал, называемый слуховым проходом, который фокусирует звуковые колебания и посылает их в среднее ухо, устроенное так же сложно, как и отвечающее за равновесие внутреннее. В конце слухового прохода находится мембранная структура — барабанная перепонка. Здесь и концентрируются звуковые волны: когда они попадают на барабанную перепонку, та вибрирует. Совсем рядом находятся и три косточки, рассмотренные в главе 2: молоточек, наковальня и стремечко — они передают звуковые колебания от наружного уха к внутреннему, одновременно усиливая их. Слуховые косточки являются самыми маленькими фрагментами скелета. Они представляют собой цепочку, передающую колебания. Рукоятка молоточка тесно срослась с барабанной перепонкой, головка молоточка соединена с на-

¹ Эта фраза звучит в культовом пародийном фильме «Это — Spinal Tap» (*This Is Spinal Tap*; 1984), псевдодокументальной картине о вымышленной британской рок-группе. Найджел Туфнел — один из главных героев фильма, рок-звезда, гитарист; регулятор громкости его усилителя отградуирован на одиннадцать позиций вместо обычных десяти, и потому он якобы играет громче других («еще на один громче»). — *Прим. ред.*

ковальной, а та, в свою очередь, своим длинным отростком — со стремечком. Вибрация мембраны барабанной перепонки — чем выше звук, тем она сильнее — провоцирует движение молоточка и запускает всю цепь. Эта конструкция работает четко и слаженно: стремечко соединено с улиткой во внутреннем ухе, и это соединение подобно поршню, вставленному в цилиндр, — жидкость улитки перемещается в соответствии с информацией звуковых волн, изначально проникших в ухо.

Улитка представляет собой удивительно замысловатую трехмерную структуру, похожую на спиральную раковину брюхоногих, но, конечно, гораздо сложнее организованную (рис. 7.3). Улитка по всей длине делится на три параллельных, заполненных жидкостью канала. Два наружных канала — лестница преддверия и барабанная лестница — сообщаются между собой у верхушки улитки и вмещают в себя перилимфу, которая по ним циркулирует, а центральный (спиральный, или кохлеарный) канал началом сообщается с мешочком, слепо оканчивается и содержит эндолимфу. Кохлеарный канал отделяется мембраной, содержащей ряд натянутых поперек параллельных волокон различной длины и толщины. Внутри мембрана покрыта снабженными волосками клетками, составляющими кортиев орган, который преобразует звуковые сигналы в нервные импульсы, поступающие затем в головной мозг.

Жидкость, проходящая через центральные каналы, то расширяет, то сжимает жидкость¹ в кохлеарном протоке и таким образом воздействует на сложный кортиев орган. Этот орган выстлан двумя видами волосков, которые могут изгибаться под действием жидкости, текущей по кохлеарным каналам. Один вид волосков называется внутренним, и в нем насчитывается около 3500 клеток, а другой, что логично, — внешним, и тут около 20000 клеток. Сгибание внутренних волосков и провоцирует нервную реакцию в нервной клетке,

¹ Сжимаемость жидкостей очень мала, и эндолимфа не сжимается, а двигается от овального окна улитки к круглому окну. При этом она сдвигает базальную мембрану кортиевого органа, что возбуждает часть волосковых клеток. — *Прим. науч. ред.*

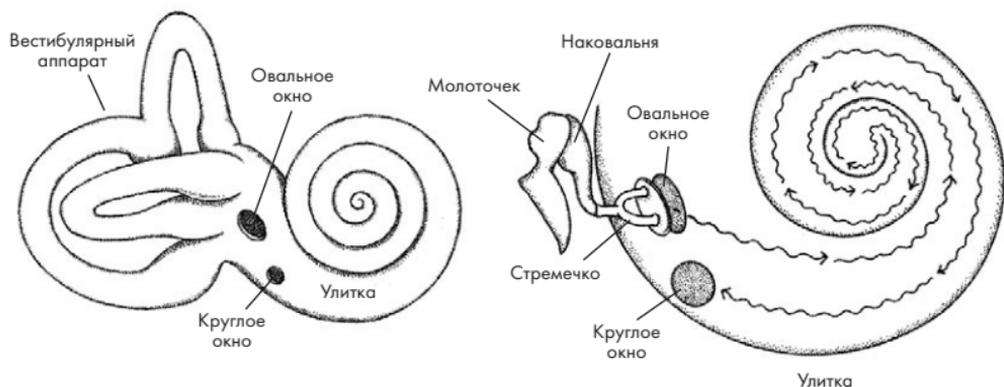


Рис. 7.3. Улитка и то, как она связана со стремечком (слева)

с которой связан кортиев орган. Здесь волоски, сгибаясь, работают так же, как и в случае с вестибулярной системой: механосенсоры передают электрические импульсы в мозг, и там они интерпретируются как звук. Внешние волоски, по-видимому, усиливают сигнал звуковой волны, поступающий во внутреннее ухо. Сгибание внутренних волосков работает наподобие выключателей света, однако давление, которое они оказывают на нервную клетку, неоднородно. Волосковые клетки вблизи спирального конца улитки более восприимчивы к сгибанию под действием высоких звуков, а волоски у основания улитки реагируют на низкие частоты. Различные тона будут восприниматься определенными волосковыми клетками в кортиевом органе. Несмотря на все эти организационные сложности и движущиеся детали, в большинстве случаев аппарат работает довольно хорошо, и это может подтвердить любой меломан.

Эта машина Руба Голдберга — еще один пример несовершенности эволюционного процесса, который сформировал столь сложную структуру для слуха. Любой толковый инженер наверняка разработал бы эту биологическую штукуну совсем иначе.

Но что бы эксперт посчитал хорошей разработкой? Эми Смит, преподаватель инженерного дела в Массачусетском технологическом институте, сформулировала семь простых правил проектирования. Одно из ее правил — экономия и производство наименее дорогого, но более эффективного продукта. Это также предполагает, что целесообразно избавляться от лишних движущихся

щихся деталей. Чем больше движущихся частей, тем выше затраты энергии. Кроме того, чем больше движущихся частей, тем больше деталей, которые могут сломаться и потребовать замены. Еще одно правило заключается в прозрачности разработки: другие должны легко понимать, что это за продукт. Не думаю, что кто-нибудь, впервые ознакомившись с описанием работы среднего и внутреннего уха, может сказать, что конструкция прозрачна. Последнее важное правило Смит иллюстрирует цитату Леонардо да Винчи: «Простота — это высшая форма сложности» — и гласит: для поиска простого решения придется потрудиться.

А эволюция так не работает. Ей выдают сырье, и она должна с ним что-то сделать. Она и делает, хоть и несколько лениво, двигаясь по пути меньшего сопротивления, который учитывает имеющийся материал. Кроме того, у эволюции не бывает второго шанса или переделок. Слуховые косточки (молоточек, наковальня и стремечко) существовали в том же месте у общего предка млекопитающих, а потом под воздействием эволюционного процесса сформировались в единую непрозрачную, сложную, но эффективную штуковину, которая очень далека от образа идеального органа, который мог бы создать хороший инженер.

Я уже говорил о возрасте как о факторе, влияющем на слух, а особенно на восприятие высоких звуков. А как же абсолютный слух, способность точно определять и воспроизводить звуки идеальной частоты и высоты без каких-либо ограничений? Этот дар дан не каждому. Ученые даже отыскивали несколько генов, ответственных за музыкальный талант, и абсолютный слух тоже попал в этот список. Неумение распознавать тоны, так называемая тональная глухота, или амузия, по всей видимости, тоже имеет генетическую основу. Похоже, что вариации этих генов действительно существенны, иначе как объяснить тот факт, что люди постоянно слышат, как минимум тонально, разные вещи из одних и тех же источников (более подробную информацию о генетике сложных признаков, затрагивающих наши чувства, можно найти в главе 12).

ТЕЛЯЧЬИ НЕЖНОСТИ

Осязание и как оно связано
с другими чувствами

Мои родители были очень трогательными: они постоянно меня трогали.

Бен Стиллер, комедийный актер

Нельзя обойти вниманием и еще одно механосенсорное чувство — осязание, осуществляемое через кожу, самый большой орган человека. Сенсорные датчики кожи, в отличие от ранее обсуждаемых других органов чувств, разнообразны. Если запоминание странных фактов не ваше хобби, названия этих рецепторов мгновенно вылетают из головы. Они совсем не так просты, как Джон, Пол, Джордж и Ринго¹: чувствительные тельца Мейснера, осязательные клетки Меркеля, нервные чувствительные окончания Руффини и пластинчатые тельца Пачини — это четыре основных вида соматосенсорных рецепторов, встроенных в дерму (рис. 8.1). Есть и еще две признанные рецепторные системы, располагающиеся на коже: ланцетовидные окончания и свободные нервные окончания.

Чувствительные тельца Мейснера реагируют на легкие касания и вибрации. Их называют рецепторами поцелуев: эти тонко чувствительные датчики посылают в мозг информацию с губ, кончиков пальцев, сосков и других наиболее восприимчивых к при-

¹ Джон Леннон, Пол Маккартни, Джордж Харрисон и Ринго Стар — участники группы The Beatles.

косновениям частей тела. Клетки Меркеля находятся в базальном слое эпидермиса кожи и в волосяных луковицах, и это расположение позволяет им воспринимать вибрацию более низкой частоты. Тельца Мейснера чувствуют вибрацию в диапазоне 10–50 Гц, а нервные окончания Меркеля улавливают частоту 5–15 Гц. И те и другие обладают малыми рецептивными полями, поэтому наиболее эффективны на кончиках пальцев, прикосновения которых фокусируются на мелких деталях. Нервные чувствительные окончания Руффини реагируют на растяжение и деформацию кожи. Это медленно адаптирующиеся рецепторы, чаще всего именно они говорят пальцам, до чего нужно дотронуться. А вот тельца Пачини различают грубые и мягкие предметы. Это быстро адаптирующиеся рецепторы, наиболее чувствительные к вибрациям в диапазоне 250 Гц, что значительно больше, чем у клеток Меркеля или Мейснера. Возникает вопрос: почему же тогда наш мозг не реагирует на раздражение от ношения одежды? Дело в том, что тельца Пачини реагируют только на внезапное раздражение: они забывают, что ткань их касается, сразу же после того, как рубашка надета на тело, и терпеливо ждут следующего резкого раздражения. Свободные нервные окончания — крутые парни механосенсорной группы: они реагируют на сенсорный сигнал, только если тот достиг болевого порога. Ланцетовидные окончания расположены в волосяных фолликулах и внимательно следят за движением волосков. Они не могут определить направление, но зато довольно хорошо — лучше, чем другие датчики, — воспринимают высокочастотные вибрации (200–1000 Гц).

Все обитатели этого «зверинца» сенсорных клеток очень разнообразны по базовым структурам, но связь с мозгом для них всех осуществляется по одной и той же схеме¹. Чтобы понять, как

¹ Эта схема называется полисинаптической рефлекторной дугой. Для соматических рефлексов тело чувствительного нейрона находится в спинном ганглии: его дендрит идет к рецептору, а аксон — в спинной мозг, где оканчивается на вставочном нейроне. Аксон вставочного нейрона оканчивается на двигательном нейроне, а аксон двигательного нейрона — непосредственно на мышце. — *Прим. науч. ред.*

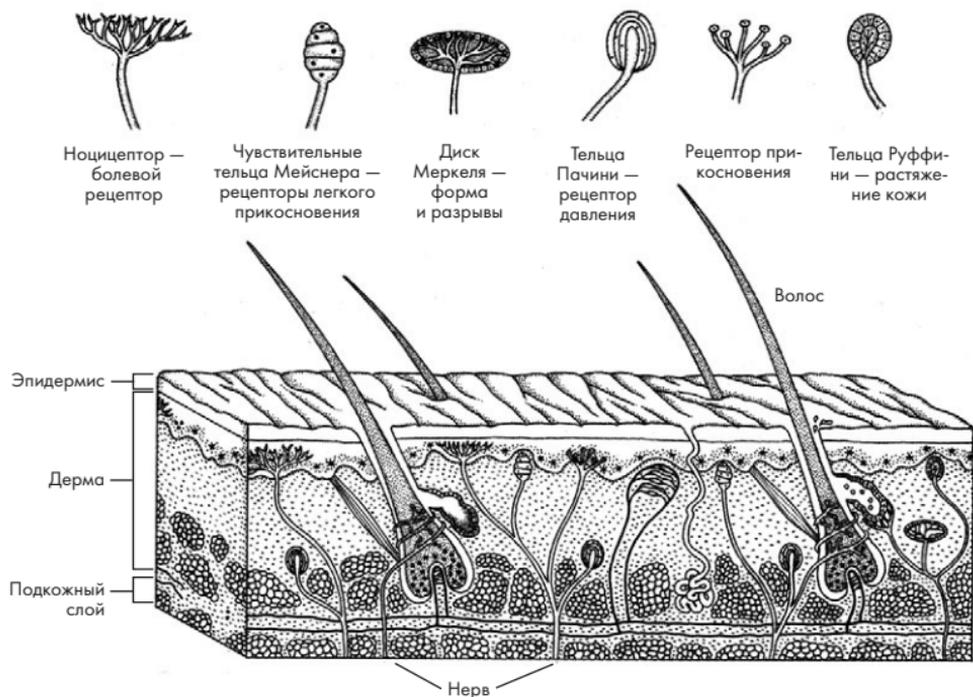


Рис. 8.1. Типы клеток, проводящих осязательные ощущения через кожу

эти рецепторы связаны с головным мозгом и его стволом, осмотр надо начать с соединений ствола головного мозга или дорсальных корешковых ганглиев (спинного мозга), расположенных вдоль позвоночника. Отсюда, от клеток этих ганглиев, тянутся аксоны, которые называются сенсорными афферентами. Эти аксоны своего рода проводка, по которой идет электрический импульс, сигнализирующий мозгу о прикосновении. Информация от сенсорных клеток передается в разные области мозга — в точном соответствии с ее видом. Например, нервные клетки, воспринимающие вибрацию, и клетки, специализирующиеся на текстуре поверхности, передают информацию разным участкам соматосенсорной коры.

В качестве примера того, как сенсорный рецептор связан с соматосенсорной корой, рассмотрим, как мозг обрабатывает прикосновение. Когда человек дотрагивается до небольшого предмета кончиком пальца, тельца Мейснера искажаются силой прикосновения. Это провоцирует реакцию в нервных окончаниях

ях, и те запускают потенциал действия. Электрический сигнал от этого потенциала действия проходит через аксон воспринимающей клетки и соединяется со спинным мозгом, откуда поступает в головной мозг. Достигнув мозга, потенциал действия идет по одному из нескольких маршрутов к сенсорной коре. Как только сигнал достигает сенсорной коры, он обрабатывается и сопрягается с миндалевидным телом и гиппокампом, подкрепляя таким образом память об ощущении. Маршруты других потенциалов действия, генерируемых различными механосенсорными клетками, организованы аналогичным образом.

По словам Дэвида Линдена и других нейробиологов, для осязания в мозге предназначены два основных проводящих пути нервной системы. Первый я только что описывал и еще упоминал его в главе 2. Линден указывает, что этот путь оканчивается в соматосенсорной коре головного мозга, куда передается информация с органов осязания. А дальше кора «воспринимает факты, поэтапно обрабатывая информацию, постепенно создает тактильные образы и распознает предметы». Другой проводящий путь связан с эмоциональным и социальным контекстом. Данные, полученные через осязание и распознавание объектов, интерпретируются при помощи двухступенчатой обработки, чтобы повлиять на наше социальное и эмоциональное поведение. И влияние это очень значительное: люди могут очень по-разному реагировать на все, что связано с прикосновениями.

Еще пять лет назад можно было с уверенностью сказать, что вариативность человеческого осязания — область малоизвестная. Исследователи знают, что некоторые индивиды чрезвычайно чувствительны к тактильным проявлениям. У многих людей с расстройствами аутистического спектра часто развивается непереносимость прикосновений. Им неприятен любой телесный контакт: он не обязательно болезненный для них, просто антипатический. И это не потому, что у них повышенная чувствительность и их нервы оголены, скорее здесь замешан социальный аспект. Кстати, тактильную чувствительность можно

снизить. Как и в случае со слухом и равновесием, осязательная способность у людей, как правило, с возрастом ухудшается. Проблемы со здоровьем тоже могут сказаться на осязании. Дефицит витамина B_{12} , диабет и инсульт могут привести к потере чувствительности некоторых частей тела. Для наследственных синдромов тоже характерны такие проявления. Например, синдром Райли — Дея поражает сенсорные нервные клетки и вызывает множество симптомов, в том числе снижение чувствительности органов осязания. Это так называемый аутосомно-рецессивный синдром, что означает: во-первых, он находится на одной из аутосом (неполовых хромосом) в геноме, а во-вторых, что нужно иметь две копии гена, который вызывает расстройство. Этот синдром чаще обычного встречается у евреев-ашкенази. Обычно человек наследует аномальные копии генов от родителей, которые были носителями. Эти родители гетерозиготны (то есть у них одна нормальная копия гена и одна ненормальная), поэтому у них признаки синдрома не выражены. Мутировавший ген, вызывающий этот синдром, известен: он называется ИКВАР. Этот ген делает белок, важный для транскрипции других генов в матричную РНК. Но его связь с этим расстройством совсем не очевидна.

Существуют и другие генетические нарушения, например болезнь Шарко — Мари — Тута (ШМТ). Этот синдром тоже является аутосомно-рецессивным генетическим признаком, и его симптом — потеря осязания (и потеря способности чувствовать боль) в конечностях: руках, ногах и стопах. Известно, что люди с этим расстройством часто получают различные повреждения и травмы из-за отсутствия чувства боли. Проявляются у них и проблемы с равновесием: не из-за нарушений в вестибулярной системе, а потому, что они не могут адекватно осознать, где находятся их ноги.

Профессор и врач Джеймс Лупски живет с болезнью ШМТ уже больше сорока лет. Считается, что в это заболевание вовлечены множественные генетические поражения, но в случае Лупски было трудно найти что-то с помощью методов, доступных

в 2010 году. Поэтому профессор и команда ученых решили секвенировать его геном и геномы членов его семьи. Секвенируя три миллиарда оснований его генома, они надеялись установить генетическую основу особого вида ШМТ, который был у Лупски. У членов семьи не было проявлений этого синдрома, и поэтому была возможность найти ген, ответственный за ШМТ, используя перекрестное связывание цепочки их ДНК с ДНК Джеймса. Это было то же самое, что искать иголку в стоге сена, но Лупски и его коллеги справились с задачей: они нашли виновника — это был ген SH3TC2.

Вот как они это сделали. Каждая цепочка ДНК — это длинная линейная молекула, состоящая из четырех нуклеотидных оснований (G, A, T и C), последовательность которых образует наши гены. Расположение G, A, T и C диктует клеткам, какие именно белки надо создавать: например, белок, присутствующий в структуре нервной клетки. Генетический код указывает, что различные аминокислоты в белке кодируются в ДНК триплетами нуклеотидов. На иллюстрации, где изображена последовательность части гена SH3TC2 (рис. 8.2), я отделяю последовательность на каждом третьем основании, потому что триплеты ДНК кодируют аминокислоты в белках.

Следующая иллюстрация — это та часть белка, для которой кодируется ДНК (рис. 8.3). Буквы под последовательностью ДНК — это аббревиатуры, обозначающие двадцать аминокислот в белках, а цифры над ней — это позиции в белке, пронумерованные от его начала. Лупски с командой сканировал свой геном на наличие тех мест, где тот отличался от эталонной человеческой последовательности (последовательности человека без ШМТ), и идентифицировал их. Эти позиции называются однонуклеотидными полиморфизмами (SNP). Исследователи должны были просеять 3 420 306 SNP. Они быстро исключи-

gga ctc ctg ata cag gaa ggc cac ttc ttc tgc aga gcc

Рис. 8.2. Частичная последовательность гена SH3TC2

162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174
gga	ctc	ctg	ata	cag	gaa	ggc	cac	ttc	ttc	tgc	aga	gcc
G	L	L	I	Q	E	G	H	F	F	C	R	A

Рис. 8.3. ДНК и последовательность белка в области SH3TC2, где происходили мутации, ведущие к болезни Шарко — Мари — Тута

ли 2 255 103 SNP, потому что те не принадлежали к области известных генов. После этого им оставалось отсортировать 1 165 204 SNP. Тогда они исключили области, которые были в генах, но не кодировали аминокислоты (такие как интроны). Это сузило поиск до 18 406 SNP — неплохо, да? Но все равно та еще работенка.

Учитывая то, как работает генетический код, ученые могли отсеять еще больше SNP. Генетический код избыточен: некоторые аминокислоты кодируются несколькими триплетами ДНК. Например, CCA, CCG, CCT и CCC являются кодами аминокислоты пролина. Если SNP находится в третьей позиции кодонов, которые кодируют пролин, он не будет кодировать другую аминокислоту. Никаких изменений, никаких нарушений, никакого вреда. Такие мутации называются молчащими, потому что они не приводят к изменению аминокислоты, кодирующей их кодон. Исключив и эти случаи, ученые пришли к 9069 SNP, которые вызвали изменения аминокислот в белке генома Лупски. Затем они использовали обширные знания по генетике, накопленные за последнее столетие в базе данных мутаций генов человека (*Human Gene Mutation Database*). Это позволило команде медицинских генетиков совместить SNP Лупски с позициями в списке менделевских наследственных заболеваний и сократить количество до 54 SNP кодирующих областей генов, связь которых с генетическими нарушениями давно доказана. Наконец удалось получить список генов, уже скомпрометировавших себя участием в нервных расстройствах, и — о чудо! — после их перекрестного перечисления в нервном гене SH3TC2 обнаружили два SNP. Определить, какой же из двух SNP вовлечен в расстройство, уже

	162	163	164	165	166	167	168	169	170	171	172	173	174
Норма	gga	ctc	ctg	ata	cag	gaa	ggc	C ac	ttc	ttc	tgc	aga	gcc
	G	L	L	I	Q	E	G	H	F	F	C	R	A
Лупски	gga	ctc	ctg	ata	cag	gaa	ggc	T ac	ttc	ttc	tgc	aga	gcc
	G	L	L	I	Q	E	G	Y	F	F	C	R	A

Рис. 8.4. ДНК и последовательность белка, показывающая место локализации мутантного гена SH3TC2 Джеймса Лупски (внизу)

не составило труда: он находится в последовательности в 169-м кодоне (рис. 8.4).

Изменение последовательности ДНК в геноме Лупски в этих цепочках выглядит как C=>T (на кодирующей нити мутация G=>A), и это вызывает сдвиг аминокислоты от гистидина (H) к тирозину (Y). Точная функция SH3TC2 все еще неизвестна, но весьма высока вероятность того, что от него зависит образование миелинового слоя, покрывающего нервные клетки. Миелинизация действует так же, как пластиковая изоляция на проводах¹. Без надлежащей миелинизации передающие в мозг осязательную информацию нервные клетки в конечном итоге теряют сигнал потенциала действия на пути следования, и до мозга доходит лишь часть данных. Эти мутации и форма ШМТ уникальны и демонстрируют силу геномики на примере невропатии чувств отдельного индивида.

Генетики пользовались и другими способами, чтобы определить гены, участвующие в работе органов слуха, но до недавнего времени подобные исследования осязания не проводились. Например, выявлено более шестидесяти наследственных синдромов нарушения слуха, а вот генетических изменений осязания обнаружено не так много (одно из них — ШМТ). Ученые-гене-

¹ Миелиновая оболочка — это множество мембран олигодендроцита, которые действительно являются хорошим изолятором. Однако важно то, что миелинизация значительно увеличивает скорость распространения потенциала действия. — *Прим. науч. ред.*

тики используют самые разные хитрости, чтобы составить карту генов и найти корреляцию генов с фенотипами, важными для понимания осязания. Стандартные лабораторные модельные системы выбирались на протяжении многих лет с учетом возможности применять в них генетические манипуляции. Одна из тонкостей модельных организмов, таких как фруктовая мушка (*Drosophila melanogaster*) и червь-нематода (*Caenorhabditis elegans*), заключается в их способности размножаться быстро и контролируемым образом. У ученых, занимающихся генетикой человека, нет таких шикарных возможностей. Этические проблемы при скрещивании генов человека настолько очевидны, что даже не стоит углубляться в этот вопрос. Поэтому генетикам приходится идти на разные уловки, как в случае с Лупски, когда искали объяснение уже известной проблеме.

Еще один метод — исследование близнецов. Этот испытанный и верный подход в генетике важен из-за способа, которым наследуются признаки. Такие исследования используют тот факт, что с генетической точки зрения есть два вида близнецов. Некоторые близнецы являются монозиготными (однойяйцевыми): они рождаются из одной яйцеклетки, которая после оплодотворения расщепляется, образуя два клона: два развивающихся эмбриона генетически идентичны, и поэтому таких близнецов называют идентичными. Другие близнецы возникают в результате одновременного оплодотворения двух яйцеклеток двумя разными сперматозоидами и называются дизиготными или фратермальными (многояйцевыми). Дизиготные близнецы связаны между собой не больше, чем братья и сестры, рожденные в разное время от одних и тех же родителей. Близнецы, участвующие в таких исследованиях, должны расти вместе, это основополагающий момент данного метода. Совместное воспитание гарантирует, что условия жизни этих двух людей будут максимально схожими. Однойяйцевые близнецы имеют одинаковые геномы, а фратермальные — разные. Но, если близнецы обоих видов живут вместе, они сталкиваются с одним и тем же окружением, и любые проявляющиеся между ними различия будут вызваны исключительно гене-

тикой, а следовательно, наблюдая за ними, исследователи могут определить наследуемость признаков. Генетики используют некий подход, результат которого и приводит к тому, что называется наследуемостью признака (h^2 , или h -квадрат). Наследуемость колеблется от 0,0 до 1,0, и признаки с наследуемостью, близкой к 1,0, считаются почти полностью генетическими; а вот признаки с наследуемостью, близкой к 0,0, считаются имеющими минимальный генетический контекст.

В 2012 году в Германии провели новаторское исследование близнецов: более трехсот субъектов приняли в нем участие. Двести из них были близнецами: шестьдесят шесть пар однойцевых и тридцать четыре пары фратеральных. Ученые получили показатели наследуемости для двух осязательных механосенсорных признаков (легкое касание и ощущение вибрации). Кроме того, были измерены показатели слуха и характеристики восприятия температуры. Исследователи смогли четко показать, что механосенсорные тактильные признаки имеют генетическую составляющую. Удивительным открытием стала сильная корреляция между осязанием и особенностями слуха. Обследования испытуемых с тяжелой степенью тугоухости показали, что у некоторых из них осязание было развито очень плохо. И это лишь подбросило дровишек в спор: всегда ли хороший слух означает хорошее осязание?

Исследователи обратились к известным синдромам, связанным с нарушением слуха, в частности к синдрому Ушера. В Европе встречается довольно много людей с таким заболеванием. Существует три основных типа синдрома Ушера — USH1, USH2 и USH3, где выраженность синдрома выше в USH1 и ниже в USH3. Клиническими проявлениями этого недуга являются ранняя глухота и пигментный ретинит, вызывающий проблемы со зрением. Используя те же сенсорные тесты, что и для близнецов, ученые изучили людей, у которых был USH2 (промежуточный тип). У всех генотипируемых испытуемых пытались обнаружить специфическую мутацию в гене, называемом *usherin* (также USH2A), который, как известно, участвует в формировании син-

дрома и кодирует белок, связанный с работой внутреннего уха. У некоторых субъектов мутация, известная как USH2A, была найдена, а вот у других — нет. Получился неожиданно четкий результат: участники с мутацией USH2A обладали низкой тактильной чувствительностью, а у тех, кто имел какие-то другие генетические изменения, осязательные способности были развиты довольно хорошо. Это исследование выявило, что мутация USH2A оказывает общее влияние как на слух, так и на осязание.

Исследователи изучали осязание и у слепых людей, пытаясь выяснить, связана ли слепота с тактильным восприятием. Результаты ясно показали отсутствие какой-либо корреляции. Но в действительности люди с нарушениями зрения очень часто имеют высокую сенсорную остроту, что явно доказывает пластичность осязания. Иногда потеря одного чувства может быть компенсирована пластичностью других.

ГЛАЗА

Пределы человеческого зрения

Глаза видят только то, что разум готов постичь.

ГЕНРИ БЕРГСОН, философ

Сходите в театр или на концерт, и велика вероятность, что вы встретите людей с разным уровнем остроты зрения. Наверняка там будут люди в очках, люди без очков, те, кто носит контактные линзы, и те, кто сделал операцию по коррекции зрения. Некто будет красоваться в очках с очень толстыми линзами, иные нацепят очки, только чтобы прочитать программку. Кое-кто невооруженным глазом будет способен разглядеть даже мелкие детали далеко за сценой. А быть может, в толпе попадетесь и слепой человек, да не один. И все это абсолютно очевидные различия зрения людей: некоторые из них возникли в результате несчастного случая, болезни или воздействия окружающей среды, другие являются врожденными. Но есть и варианты, которые просто невозможно определить по внешнему виду. Вполне вероятно, что среди досточтимой публики найдется пара мужчин, не различающих зеленый и красный цвета, и тройка женщин, способная распознать особо причудливые оттенки бордо. У кого-то может быть туннельное (слабое периферическое) зрение, а кому-то придется прятаться за темными очками, чтобы ограничить свет, бьющий в глаза. Все эти вариации связаны с работой органов зрения (рис. 9.1).

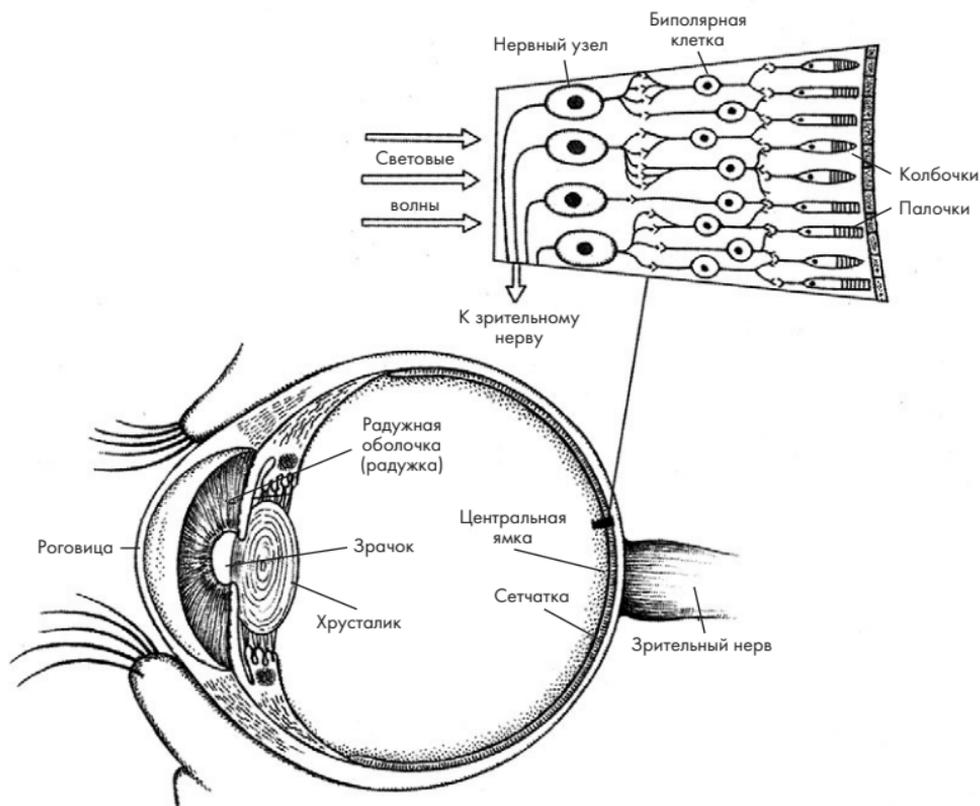


Рис. 9.1. Строение глаза и сетчатки

В глазах млекопитающих свет проходит к сетчатке вдоль условной линии, которая называется зрительной — или третьей главной оптической — осью. Это прямая линия, идущая от наблюдаемого объекта к середине центральной ямки сетчатки. По пути к сетчатке свет проходит через несколько слоев соединений и структур глаза. Сначала это маслянистая слезная пленка, покрывающая глаз: она защищает, смазывает и сохраняет поверхность глаза чистой. Дальше идет роговица, выглядящая как прозрачная ткань, но довольно сложная, с несколькими специальными слоями. Роговица фокусирует больше половины света, который воспринимает глаз. После этого свет попадает в переднюю камеру. Эта структура наполнена жидкостью и примыкает вплотную к следующему элементу строения глаза по зрительной оси — радужной оболочке, которая контролирует размер зрачка. Радужная оболочка, или радужка, содержит пигмент, благодаря

которому появляются бездонные синие глаза, волнующие зеленые или удивительные карие. Следующее звено по зрительной оси — зрачок; он может увеличиваться в диаметре, чтобы больше света проникало в остальную часть глаза, или сокращаться для ограничения количества света, поступающего вдоль зрительной оси. Дальше идет хрусталик. Он выпуклый, и с его помощью свет вдоль зрительной оси фокусируется на сетчатке. Между хрусталиком и сетчаткой находится большая структура — стекловидное тело. Свет, прежде чем попасть на сетчатку, проходит через него. И последняя часть глаза большинства млекопитающих — это сетчатка.

Люди с супервидением — это что-то из области мифических персонажей, их существование настолько сомнительно, что любое проявление зрительных сверхспособностей тут же становится интернет-мемом и обрастает подозрениями. Два недавних случая особенно интересны, ведь независимо от того, правда это или нет, они дают информацию о пределах человеческого зрения.

Первая история супервидения рассказывает о женщине из Германии по имени Вероника Зайдер. В 1970-е годы ее объявили человеком с самым лучшим зрением на планете, потому что она утверждала, что видит детали объектов, находящихся на расстоянии более полутора километров. Согласно источникам информации, она даже могла идентифицировать людей на такой дистанции: у нее было зрение 20/2, а может, даже 20/1! У большинства людей острота зрения равна 20/20 (или 6/6, если вы пользуетесь метрической системой), что означает, что они могут ясно видеть объекты на расстоянии 20 футов, или 6 метров. Если у человека зрение 20/200 (6/60), это значит, что на расстоянии 20 футов (6 метров) он будет видеть то же самое, что человек со зрением 20/20 видит на расстоянии 200 футов (60 метров). Другими словами, человек с показателями зрения 20/200 (6/60) видит примерно одну десятую того, что видит большинство. Показатели Зайдер — 20/2 (6/0,6), а значит, на расстоянии 20 футов (6 метров) она четко различает то, что средний человек видит в 2 футах (60 см) от себя. Ее зрение в десять, а то и в двадцать раз

лучше, чем у обычных людей, оно такое же острое, если не лучше, как и у хищных птиц, чьи показатели — 20/2 (6/0,6).

Бейсболисты, чей удар сильно зависит от остроты зрения, должны определять скорость и распознавать вращение мяча задолго до того, как тот достигнет пластины, чтобы замах битой был своевременным и точным. Например, посчитали, что неправильная оценка скорости подачи всего на 4 км/ч ведет к тому, что игрок пытается отбить мяч либо на 30 см раньше, либо позже. Все подачи для великих питчеров выглядят по-разному. Вот для меня все одно: что фастбол, что слайдер, что форкбол или чейндж-ап¹ — я вижу лишь мутное пятно (именно поэтому моя карьера в бейсболе закончилась еще в средней школе). А для Уэйда Боггса или великого Теда Уильямса фастбол выглядит белым, при слайдере появляется красная точка, а кербол характерен вращающимися полосами. Некоторые питчеры при ударе достигают состояния бейсбольной nirваны, называемой точной фовеальной фиксацией. Это состояние, когда питчер видит мяч с такой точностью, что может определить, где именно тот пересечет пластину, и нахождение в той самой зоне, по-видимому, и вызывают эйфорию. Фовеа, или центральная ямка, — это крошечная область сетчатки, где достигается наиболее сфокусированное, четкое и детальное зрение, она и отвечает за фовеальную фиксацию. Лучше всего это можно объяснить на примере известного теста. Посмотрите на изображенные ниже фигуры и в течение нескольких секунд сосредоточьте взгляд на символе зарегистрированного товарного знака (®), а затем, продолжая концентрировать внимание на этом символе, попытайтесь понять, как вы видите фигуры справа и слева от него.

У Н П М ∇ ⊗ ® ℞ Ψ Ω ζ К ξ П

Если вы все сделали правильно, то другие фигуры кажутся немного размытыми. Это происходит потому, что на знаке ре-

¹ Названия бросков в бейсболе.

гистрации вы фокусируете фовеальную область сетчатки, и это единственное, что вы способны видеть с остротой зрения 6/6 (или 20/20). Есть кое-что особенное в строении центральной ямки, необходимое для понимания работы зрения.

Второй интернет-мем — это китайский мальчик-кот, которого зовут Нонг Юхуй. В 2012 году стало известно, что этот мальчик может видеть в темноте, а его глаза светятся, как у кошки. Странники теории инопланетного заговора тут же дополнили историю красочными подробностями (увы, такова сущность интернета), и информация о Нонге сейчас довольно сумбурна. Однако это не отменяет того факта, что мальчик действительно хорошо видит в темноте. А кошачье свечение появилось из-за недостатка пигмента в клетках глаз, вызванного расстройством, называемым глазным альбинизмом. Животные с исключительно прекрасным ночным зрением, такие как кошки, имеют отражающий слой ткани, связанный с сетчаткой, который называется тапетум (*tapetum lucidum*). Благодаря ему на сетчатку поступает больше света. Тапетум отражает свет, поэтому и светится в темноте, однако глаза Нонга — это другой случай. Между глазным альбинизмом и наличием тапетума нет ни генетической, ни анатомической связи.

Глаза животных с ночным зрением имеют повышенное количество клеток сетчатки. Сетчатка состоит из тысяч маленьких палочек и колбочек. У кошек в сетчатке гораздо больше палочек, и, хотя сетчатку Нонга никто не исследовал, держу пари, что в ней тоже преобладают палочки. Вероятно, после этих двух историй вам стало любопытно узнать о строении сетчатки и о всех этих палочках и колбочках.

Глаза позвоночных устроены довольно сложно, в них множество структур, с помощью которых мы фильтруем свет и фокусируем взгляд, однако большая часть событий происходит на сетчатке, поэтому имеет смысл рассмотреть ее подробнее. Для начала запомните, что на сетчатке и возникает потенциал действия, посылающий в мозг электрические импульсы (в главе 10 вы узнаете, куда именно в мозге приходят в итоге эти сигналы).

Сетчатка — это в буквальном смысле поле, на котором находятся два вида специализированных рецепторных клеток: палочек и колбочек. Все они напрямую связаны с мозгом. На самом деле многие неврологи считают сетчатку частью мозга¹. То, как все эти палочки и колбочки распределяются по сетчатке и какой свет они чувствуют, в большей степени определяет, что происходит с нашим зрением. Надо заметить, что на сетчатке есть еще и третий тип фоторецепторов — светочувствительные клетки [pRGC]. Их обнаружили примерно сто лет назад у слепых мышей. Эти клетки будут реагировать на свет, даже если палочки и колбочки отсутствуют или выведены из строя. Клетки pRGC участвуют в поддержании суточных биоритмов и лишь опосредованно связаны со зрением.

Колбочки отвечают за остроту зрения, или разрешающую способность, поэтому фовеа, или центральная ямка, заполнена только клетками этого типа. Чем больше колбочек в фовеа, тем лучше она функционально согласована с остротой или разрешением. Кроме того, именно здесь подбирается наилучшее цветовое разрешение для нашей зрительной системы. Но неверно было бы предположить, что цветоощущение и острота каким-то образом связаны. Несмотря на то что обе эти функции выполняются колбочками, это разные явления.

При плохом освещении, когда нет необходимости в определении цвета и сильной остроте, за дело берутся палочки. Неудивительно, что область, отвечающая за зрение при низком уровне освещенности, находится вдали от центральной ямки, на периферии сетчатки, ведь именно здесь и обитают все палочки.

Составляющие сетчатку палочки и колбочки очень плотно уложены. На концах, направленных к внешней стороне клеток, находятся белки, которые встроены в клеточную мембрану и обращены наружу. Эти специализированные фоторецепторные белки

¹ Сетчатка глаза развивается из выроста промежуточного мозга. — *Прим. науч. ред.*

называются опсинами, и их структура очень похожа на структуру хеморецепторов, описанных в начале книги. Для того чтобы закрепить опсин в палочке или колбочке, существуют семь трансмембранных доменов, которые входят и выходят через клеточную мембрану. Как и в случае с хеморецепторами, один конец белка лежит на внешней стороне клетки, а небольшой хвост белка — на внутренней. В том месте, где расположены семь охватывающих мембрану доменов, уютно устроилась небольшая молекула хромофора, называемая 11-цис-ретиналь, — прямо рядом с белком, соединенная с его внутренней частью. Хромофор фотореактивен: когда на него воздействует фотон определенной длины волны, он изомеризуется (меняет форму, но не химический состав) и вываливается из своего уютного домика в сетчатке — опсина. Это изгнание молекулы, в свою очередь, приводит к изменению структуры самого опсина и запускает те же самые реакции G-белка, которые мы наблюдали при хеморецепции, когда я рассказывал про запах и вкус.

Человеческие опсины представляют собой большой и разнообразный набор белков, кодируемых генами в геноме человека. Существует девять основных типов, но не все они задействованы в работе зрительной системы. Со зрением связаны родопсин, красный опсин, зеленый опсин и синий опсин. Важным аспектом в развитии хорошего цветового зрения у людей стало то, что зеленый и красный опсины находятся рядом друг с другом на X-хромосоме в геноме человека. Синие опсины расположены на седьмой хромосоме человека, а родопсин, последний участвующий в цветовом зрении опсин, находится на третьей хромосоме.

Свет, одновременно представляющий собой и волну, и поток частиц, состоит из фотонов, имеющих определенную длину волны. Для любого фотона видимой длины волны существует реагирующий на него опсин. Другие опсины будут просто сидеть и ждать, когда на них попадет фотон подходящей им длины волны. Так, например, любые попадающие на сетчатку фотоны с длиной волны 557 нм (свет имеет чрезвычайно малую длину волны)

будут проходить через все виды клеток сетчатки, однако реагировать будет только опсин в колбочковых клетках, ответственных за восприятие красного цвета¹. А если фотон имеет длину волны 420 нм, он опять же будет проходить через все виды палочек и колбочек на сетчатке и, следовательно, через много опсинов, но реагировать на него будет только опсин синего цвета в колбочках. Как ни странно, но, если на сетчатку попадает мало света (то есть вокруг темно), выключаются все опсины колбочек и начинает работать опсин палочек, или родопсин. Он вступает в реакцию с фотонами с длиной волны около 505 нм и интерпретирует фотореакцию и последующую фототрансдукцию (сигнал в мозг) как сине-зеленый цвет. Именно поэтому ночное видение, которое у нас может быть, относительно бесцветно. Конечно, свет, попадающий в наши глаза, существует в определенном диапазоне длин волн, а не только составляет 557, 420 или 505 нанометров. Поэтому, хоть фотоны с длиной волны 557 нм и оптимальны для реакции с находящимся в колбочках опсином красного цвета, опсин будет реагировать и, скажем, на волну длиной 550 нм — только с меньшим энтузиазмом. Собственно, этот опсин будет реагировать со светом вплоть до 500 нм, но опять же не так эффективно, как со светом на 557 нм. Этот энтузиазм опсина, реагирующего на определенную длину волны, и определяет степень, с которой G-связанный каскад посылает сообщения в мозг и влияет на то, как сетчатка воспринимает различные оттенки красного, зеленого или синего.

Ученые, проанализировав геномы разных людей, на основе знания о цветовом зрении пришли к выводу, что существуют

¹ Восприятие цвета — не физический, а психологический феномен. У всех трех видов колбочек спектры чувствительности очень широкие и значительно перекрываются. Свет с длиной волны 557 нм будет сильно возбуждать L-тип колбочек, немного меньше — M-тип и почти не будет возбуждать S-тип. Для нас такой цвет будет казаться желто-оранжевым. Однако, если использовать несколько длин волн, скажем 650 нм и 540 нм, и правильно подобрать их яркость, мы также увидим желто-оранжевый цвет. — *Прим. науч. ред.*

несколько видов опсинов как для красно-зеленых, так и для синих колбочек. Разные виды красно-зеленых опсинов называются длинноволновыми и существуют в двух основных вариантах: длинноволновые (L) и средневолновые (M). Коротковолновые опсины (S) — это опсины синего цвета.

Эволюция генов опсинов для волн разной длины — история занимательная. Можно понять, как человек воспринимает цвет, если посмотреть на распределение опсинов у организмов на древе жизни. У некоторых бактерий есть гены опсинов, и они используют их как источник энергии, получаемой из света. Единственная общая черта опсинов всех организмов, имеющих их, состоит в том, что они используют небольшую молекулу — ретиналь — в качестве партнера по функции. Поскольку под действием света ретиналь изомеризуется, изменение формы этой маленькой молекулы использовалось на древе жизни для разных задач. У растений нет опсинов, как и у некоторых очень примитивных животных — например, у губок или у похожих на блины пластинчатых. Но у этих двух рано отделившихся от общей ветви животных и у растений нет даже нервов, не говоря уже о мозге. У книдарий (стрекающих), таких как медузы, кораллы и гидры, есть органы свечения и опсины. У гребневиков, или ктенофор, опсины тоже есть. В некоторых случаях эти организмы имеют нейронную сеть и большое количество опсинов, что позволяет предположить, что они воспринимают широкий диапазон света. А кубомедуза — одна из стрекающих кишечнополостных, по форме напоминающая коробку, — обладательница восемнадцати генов опсинов и сложного светочувствительного органа, оснащенного даже линзой!

Но именно у позвоночных гены опсина действительно закрепились. И хотя те мягкие организмы, которые непосредственно предшествуют позвоночным на древе жизни, такие как морские ежи, асцидии и кишечнодышащие, имеют совсем мало генов опсина (менее пяти), у позвоночных — рыб, лягушек, ящериц и птиц — их уже гораздо больше (иногда более двадцати).

Как же число опсинов подскочило до двадцати? Если у предшествующих позвоночным животных их только пять, то и у общего

предка позвоночных их должно было быть максимум пять. Появление большего числа генов опсинов совпадает с определенным событием в эволюции позвоночных, которое и проливает свет на еще один способ образования новых генов в геномах организмов.

У общего предка оболочников (асцидий и полухордовых) и позвоночных тоже было только пять опсинов. По мере того как оболочники делились на разные ветви, у них все еще оставалось по пять генов или даже меньше. Однако общий предок всех позвоночных (другой, не тот, кто был общим для позвоночных и оболочников) весь геном дублировал на себя, причем не один раз, а дважды. Дубликации целых геномов довольно распространены у растений (полиплоидия популярна среди них), но у животных они встречаются редко. А значит, это редкое двойное дублирование генома привело к увеличению генов в геномах позвоночных.

Но на этом пути с млекопитающими произошла забавная вещь: количество генов опсинов было сброшено до восьми. Яйцекладущий утконос, ближайший родственник сумчатых, сохранил одиннадцать опсинов, поэтому постепенная потеря генов у млекопитающих более чем вероятна: они остановились на восьми. Как вариант, некоторые гены опсинов у утконоса могли образоваться в результате дубликации генов (в отличие от дубликации всего генома). Такое изменение числа генов опсинов у млекопитающих вовсе не удивительно, если учесть, что их предок, скорее всего, вел ночной образ жизни и не нуждался в большом наборе светочувствительных молекул. Судя по всему, восемь генов опсинов стали своего рода золотой серединой для млекопитающих, хотя у людей в геномах их обычно девять. А еще одна интересная эволюционная штука случилась на пути к приматам. Восемь генов опсинов предка приматов включили родопсин, опсин L/M и опсин S, необходимые для цветного зрения. Опсин L/M — это один опсин, существующий в двух формах: L (длинноволновой) и M (средневолновой).

Из девяти опсинов в геноме человека в цветовом зрении используются родопсин, S-опсин на хромосоме 7 и два опсина (L и M) в X-хромосоме. Людям нужны все три опсина, которые дол-

жны быть выражены в колбочках, чтобы цветовое зрение было нормальным, то есть трихроматическим. Но каждый опсин может мутировать и стать нефункциональным, может иметь пониженную функцию или реагировать на волну другой длины. Кроме того, существует вероятность, что в результате смешивания гена опсина L (красного) с зеленым геном опсина M возникнут гибридные опсины. Поскольку эти два гена имеют похожие последовательности, они часто выстраиваются друг напротив друга в хромосомах, поэтому может произойти рекомбинация, в результате которой появятся два продукта: один с красным геном спереди и зеленым геном сзади, а другой с зеленым геном спереди и красным геном сзади.

Из-за всех этих возможностей существует масса причин, по которым у мужчин может быть нарушено цветовое восприятие. И все из-за того, что L- и M-опсины связаны с X-хромосомой. Учитывая, что на разных хромосомах есть всего два локуса и существует только единственная комбинация, которая дает трихро-

9.1 | НАШ ГЕНОМ

В каждой клетке человеческого организма двадцать три пары хромосом. Существует двадцать две пары так называемых аутосом, пронумерованных от 1 до 22 (самая большая хромосома по количеству ДНК имеет номер 1, а самая маленькая — 22). Аутосомы — это совокупность хромосом, обычно не участвующих в определении пола. Последняя, или двадцать третья пара, — это половые хромосомы; у женщин есть две хромосомы одного и того же типа, называемые X-хромосомами. (X-хромосома — одна из самых больших хромосом в нашем геноме, она содержит примерно две тысячи генов.) У мужчин есть одна X-хромосома с двумя тысячами генов и хромосома поменьше, содержащая около пятисот генов, — Y-хромосома. Большинство генов Y-хромосомы отсутствуют в X, поэтому у мужчин только одна копия любого гена, находящегося в X-хромосоме.

матическое зрение (при наличии по крайней мере одного L, M и S), могут возникнуть некие другие комбинации генов, при которых цветовое зрение будет недостаточным.

Комбинация опсинов у мужчины с нормальным цветовым зрением, или трихроматическим зрением, была бы LM/Y S/S или LM/Y S/z, где LM/Y представляет гены опсина из X-хромосомы матери и Y-хромосомы отца, в которой отсутствует опсин. Символ z сообщает, что опсин нефункционален или отсутствует. Обозначения S/S и S/z указывают на возможные комбинации опсинов из хромосомы 7, по одной от каждого родителя. Если вам не повезло и вы родились мужчиной без функционирующих генов L, M и S (опять же представленных z), генетически у вас будет схема — zz/Y z/z, и тогда вы — обладатель монохроматического зрения и совсем не способны различать цвета. Другими словами, в ваших колбочках вообще нет опсинов. Какое-никакое зрение все еще остается, потому что в палочках присутствует родопсин, но жизнь ваша будет темной и мрачной. Это состояние характерно для большинства людей на острове Пингелап в Микронезии.

Другие условия, при которых мужчина будет иметь монохроматическое зрение, выглядят следующим образом: Lz/Y z/z, zM/Y z/z, zz/Y S/S или zz/Y S/z. В двух случаях гены опсина из X-хромосомы матери содержат только L- (Lz/Y z/z) или M-опсин (zM/Y z/z), или, другими словами, только один опсин вместо обычно связанных двух, и мир предстанет перед вами в черно-белом цвете. В случаях zz/Y S/S и zz/Y S/z в колбочках находится только один вид опсина (S), и ваш черно-белый мир будет чрезвычайно контрастен. У женщин больше шансов восполнить недостающие X-хромосомные опсины, и поэтому частота проявления монохроматического эффекта у них значительно ниже, чем у мужчин. В разных популяциях мужчины с дихроматическим зрением встречаются совсем не редко. Например, генотип приблизительно каждого десятого мужчины североευропейского происхождения выглядит следующим образом: Lz/Y S/S, Lz/Y S/s, zM/Y S/S или zM/Y S/s, то есть содержит два опсина в колбочках. Такие люди обладают дихроматическим зрением и не могут различать

определенные комбинации цветов в зависимости от того, какие именно опсины смешиваются, чаще всего они страдают красно-зеленым дальтонизмом.

Существуют три основные разновидности дихроматического зрения: протанопия, дейтеранопия и тританопия. У протанопов не функционирует или отсутствует М-опсин (Lz/Y S/S или Lz/Y S/s), а следовательно, нет никаких красных колбочек. У дейтеранопов нет L-опсина (zM/Y S/S или zM/Y S/s), а значит, нет зеленых колбочек. Тританопы встречаются крайне редко: у них отсутствуют синие колбочки из-за нефункциональных S-опсинов (LM/Y z/z). Все эти комбинации генов опсина в организме человека приводят к снижению цветового зрения. Однако существуют и другие схемы, из-за которых может наблюдаться аномальная трихромазия. Речь идет о лицах с тремя типами опсинов, а следовательно, тремя видами колбочек, но один из этих опсинов — гибридный ген L/M, о котором я говорил ранее. Эти люди, как правило мужчины, видят мир трехцветным, но эти три цвета немного искажены по сравнению с теми, что видит нормальный трихромат.

Обратите внимание, что в описанных схемах цветового зрения гены теряются в результате мутаций или даже полного их удаления, но может произойти и обратное. Бывает, что в геноме возникает добавочный ген опсина или даже два. У многих животных появились дополнительные гены опсина, чтобы повысить их способность цветовосприятия. И это не просто добавление опсинов вне диапазона восприятия человека (от 400 до 700 нм). Нельзя сказать, что насекомые и другие животные не обладают дополнительными механизмами обнаружения за пределами диапазона от 400 до 700 нм.

Как отмечалось ранее, простые мутации в генах опсина могут менять длину волны света, на которую опсин будет реагировать с максимальным энтузиазмом. Если в организме есть опсин, который лучше всего реагирует на свет с длиной волны 560 нм, то опсины будут максимально реагировать на свет этой длины волны и меньше — на другие длины волн. Организмы могут видеть цвет

на длинах волн, отличных от оптимальной длины волны для своих опсинов. Но если добавляется опсин, специфичный для определенной длины волны, не охваченной нормальными опсинами, то цветовое зрение акцентируется на длине волны, оптимальной для этого добавленного опсина, что обогащает цветовосприятие организма.

Например, у бабочек и ракообразных из отряда ротоногих ситуация доведена до крайности. Зрение у некоторых бабочек три- и тетрахроматическое, но у них добавились дополнительные опсины для более точной настройки восприятия цвета. У белянок целых семь опсинов цветового зрения, причем некоторые из них являются просто дополнениями, работающими немного по-другому. Ротоногие ракообразные удивительным образом обладают двадцатью опсинами для цветоощущения. Кроме того, у них есть шесть опсинов, которые обнаруживают поляризованный свет, и два — для восприятия люминесценции. Наличие двадцати опсинов означает, что по крайней мере двенадцать волн разной длины являются специфическими для опсинов этих организмов, и это усиливает трихроматическое цветовое зрение ротоногих и делает его в большей степени предназначенным для узких участков спектра.

Подобные дополнения к человеческому геному привели бы к появлению людей с так называемым тетрахроматическим зрением. У них было бы четыре вида колбочек, и в большинстве случаев у мужчин нет шанса получить правильные L- и M-опсины, потому что у них одна X-хромосома. Уж скорее они станут обладателями меньшего числа генов опсина по сравнению с нормальным трихроматическим состоянием. А вот женщинам выпало даже два шанса, ведь у них есть две Xs, что увеличивает возможность стать тетрахроматом. У таких особей был бы дополнительный вид колбочек, и теоретически они могли бы видеть больше цветов, чем трихроматы, в распоряжении которых уже миллионы цветов.

Науке известно очень немного случаев тетрахроматии у людей, и, даже когда та подтверждена на уровне генома, трудно

определить диапазон цветового зрения, которым могут обладать эти женщины. Объясняется это тем, что наличие четырех видов колбочек не означает, что мозг сможет интерпретировать те сигналы, которые эти колбочки обнаружили как разные цвета. Как ни странно, но, чтобы найти тетрахроматических женщин, обычно надо начинать с поиска мужчин с измененным цветовым зрением. Это должны быть аномальные трихроматы, получившие гены «сверху». Матери передали этим мужчинам, своим сыновьям, X-хромосому с аномальным рекомбинантным опсином, благодаря которому появляется четвертый тип колбочек. Если у матери также есть нормальные гены L- и M-опсина на другой X-хромосоме и два нормальных S-опсина на двух хромосомах 7 в геноме, то появляются четыре колбочки: L, M, S опсины и L/M опсин (рекомбинантный ген, который она передала своему сыну с аномальной трихроматией). Теоретически такая женщина могла бы воспринимать четыре диапазона световых волн разной длины.

Найти потенциальных тетрахроматов не так уж сложно. Как правило, это женщины, считающие, что у них экстраординарное цветовое зрение. Существует простой тест, позволяющий определить, обладают ли они геномной предрасположенностью к тетрахроматическому цветовому зрению (он основан на упорядочении локусов генов опсина на X-хромосомах). А вот найти геномных тетрахроматов гораздо сложнее, хотя некоторые исследователи предполагают, что до 2% женщин на планете являются ими. В интернете можно прочитать несколько убедительных историй о женщинах с тетрахроматическим зрением (как правило, из мира искусства), но эти случаи редки (см. вставку 9.2). А иногда, даже если и удастся отыскать геномных тетрахроматов, оказывается, что их цветовое зрение не лучше, чем у трихроматов. В 2010 году Габи Джордан и ее коллеги исследовали относительно большую популяцию с использованием аномального трихроматического подхода и обнаружили двадцать четыре женщины, которые были геномными тетрахроматами. Однако после нескольких тестов цветового зрения было установлено,

9.2 | ЦВЕТОВОЕ ЗРЕНИЕ У ОБЕЗЬЯН

У самцов узконосых обезьян, или обезьян Старого Света, встречается особенно интересная схема. У них есть две половые хромосомы — одна X и одна Y. L/М-опсин находится на X, и поэтому у самцов этого вида обезьян есть только одна копия L/М-опсина, и они по счастливой случайности получают либо L-опсин, либо М-опсин. Состояние с наличием одного L- или М-опсина и S-опсина называется дихромазией. Так или иначе, самцы этого вида различают только два цвета, потому что у них есть только два вида колбочек в сетчатке. У самок при этом два опсина, и в некоторых случаях они получают третий смешанный L- и М-опсин, и это позволяет им иметь трехцветное зрение, или трихромность. Кроме того, у некоторых самок схема будет либо М/М, либо L/L, и они будут видеть только два цвета. Самцы неизбежно будут дихроматами, а самки — трихроматами и дихроматами. Таким образом, в любой популяции узконосых обезьян существует три представления о мире цветов: дихроматический мир М, дихроматический мир L и трихроматический мир.

что только у одной из них было что-то похожее на тетрахроматическое зрение.

Кимберли Джеймсон и ее коллеги протестировали четырех человек, пытаясь найти связь между художественными способностями и тетрахроматическим зрением. Они разработали эксперимент, в котором сравнение производилось между двумя состояниями для каждой из двух переменных: художник-тетрахромат, художник-трихромат, нехудожник-тетрахромат и нехудожник-трихромат. Затем они рассмотрели три основных вопроса, сопоставив результаты теста цветового зрения у всех четырех участников, по следующей схеме:

- Влияет ли геномный состав индивида на цветовое зрение? Этот тест просто сравнивал художника-тетрахромата и не-

художника-тетрахромата с художником-трихроматом и нехудожником-трихроматом. Если усиленное цветовое зрение было обнаружено при наличии четырех генов опсина против трех, то оно имеет геномный компонент.

- Влияет ли художественное образование на цветовое зрение? В этом тесте художник-трихромат и художник-тетрахромат сравнивались с нехудожником-трихроматом и нехудожником-тетрахроматом.
- Наконец, предполагают ли художественное образование и геномный состав усиленное цветовое зрение? Этот тест включал сравнение художника-тетрахромата и нехудожника-трихромата с художником-трихроматом и нехудожником-тетрахроматом.

Только второй тест не дал значимых результатов, указывая на то, что художественного образования недостаточно для улучшения цветового зрения. Два других теста показывают, что существует геномный компонент и что образование и геномный компонент работают синергетически. Очевидно, что количество участников ставит полученные выводы под сомнение, но в качестве первой попытки понять тетрахроматическое улучшение цветового зрения это исследование установило довольно высокую планку.

Да, современные люди довольно сильно отличаются друг от друга по цветовосприятию. Но можем ли мы что-то сказать о наших близких вымерших родственниках, таких как неандертальцы? Благодаря удивительным разработкам технологий секвенирования генома ученые теперь могут изучать геномы вымерших или давно умерших особей. На данный момент самый старый образец для анализа ДНК — *Homo sapiens* возрастом 450 000 лет, найденный в Испании. Сейчас появляется все больше секвенированных геномов давно умерших неандертальцев и *H. sapiens*, и поэтому можно взглянуть на многочисленные ядерно-кодированные гены в геноме в том виде, в котором они существовали десятки тысяч лет назад. И, очевидно, поинтересоваться: воспринимали ли наши архаичные родственники цвет так же, как мы? Ведь

наш современный стиль жизни требует улучшенного цветового зрения, которое, возможно, развилось недавно, уже после нашего расхождения с архаичными людьми. Кроме того, анатомические данные и экологическое распределение неандертальцев позволяют предположить, что они любили более тусклый свет, чем современные люди. Джон Тейлор и Томас Реймхен исследовали этот вопрос, изучив несколько геномов неандертальцев и некоторые современные ископаемые геномы *H. sapiens*. Кроме того, был исследован экземпляр третьего рода *Homo*, найденный в Денисовой пещере в Центральной Азии, называемый денисовским человеком, или денисовцем. Авторы не обнаружили значимых различий между нашими современными генами опсина и генами опсина неандертальцев, денисовца и давно умерших *H. sapiens*. Этот результат поразителен, учитывая, что проверенным геномам больше тридцати тысяч лет.

ВСЯКОЕ МОЖЕТ СЛУЧИТЬСЯ

Травмы мозга и их влияние на чувства

Вероятно, я ударился головой, когда попал в аварию. Такое может быть? У меня была черепно-мозговая травма? У меня галлюцинации? Я не верил в это.

А. Б. ШЕПАРД, писатель

Наш организм имеет щит — просто чтобы отгородиться от вредного воздействия окружающей среды. И иногда эти защитные средства и механизмы преграждают путь многим сигналам из внешнего мира, которые не проникают в тело и, следовательно, не поступают в мозг. Однако в ходе эволюционного процесса появились разнообразные способы, помогающие лучшему восприятию информации извне и точной передаче ее в мозг. Например, кожа обеспечивает защиту от пыли, грязи, микробов и других факторов окружающей среды, которые могли бы причинить нам вред, и она же первая реагирует на любое физическое взаимодействие нашего тела с внешним миром, такое как давление воздуха или удар обо что-то. Уши собирают и фильтруют звуковые волны, воздействию которых мы подвержены постоянно. Глаза получают, сортируют и передают информацию, которую несут световые волны.

Таким образом, процесс восприятия мира начинается примерно в одном и том же месте — в клетках, которые первыми реагируют на внешние раздражители. Некоторые чувства, такие как обоняние и вкус, действуют довольно просто и единооб-

разно. Здесь задействован только один механизм первой реакции — механизм замка и ключа. Разнообразие всего того, что мы можем попробовать и понюхать, эти органы чувств воспринимают как вариации на тему. Зрение похоже на восприятие запаха и вкуса тем, что первый отклик приходит от клеточного компонента (белка, который семь раз пронизывает мембрану), очень напоминающего те, которые используются при первой реакции в ответ на запахи и вкусы. Отличие же реакции зрения заключается в том, что механизм замка и ключа не используется. Вместо этого свет попадает на клетку и выталкивает ассоциированную молекулу (ретиаль) из встроенного в клетку сетчатки рецептора опсина, и это запускает дальнейшие биохимические реакции в палочках и колбочках сетчатки. Тактильное чувство уникально, и оно задействует несколько видов клеток при первой реакции, но опять же, как только они активируются, все происходящее в этих клетках становится просто вариацией на тему, запускающей потенциал действия для мозга. Равновесие и слух также тесно связаны с тем, как клетки в этих системах действуют в первый момент. И в том и в другом случае решающее значение для первой реакции имеет изгиб маленьких ресничек, или волосков. Даже ноцицепция (боль) и температура воздействуют на первую чувствительную клетку, конечная задача которой заключается в передаче сигнала (потенциала действия) в нервную систему.

Как только потенциал действия инициируется и передается из клетки, нервная система реагирует практически одинаково для всех этих чувств. Основная задача периферической нервной системы — передача электрического потенциала действия в мозг. Каждый орган чувств имеет свои нервные пути, и поэтому сигналы поступают в самые разные части мозга. Процесс, происходящий в мозге, довольно сложен, и важно понимать, что чувства не просто проецируются на мозг потенциалом действия. На самом деле сигнал от одного источника запаха достигает нескольких областей мозга, и восприятие любого одоранта представляет собой комбинацию потенциала действия, идущего к различным частям

мозга, где это восприятие и формируется при помощи мыслительных процессов. Чтобы поведать историю наших чувств, я использовал чувства животных и странные человеческие ощущения.

Есть еще один способ, который ученые применяют при исследовании работы мозга и его влияния на чувства. То, насколько разумен и пластичен наш мозг при восприятии информации от органов чувств, видно на примере людей с некоторыми черепно-мозговыми травмами: достаточно понаблюдать за их поведением после подобных травм или операций на мозге. У этого подхода даже есть название — клинико-анатомический корреляционный метод. Я уже упоминал эксперименты Уайлдера Пенфилда, проводившего операции на открытом мозге. На примерах, приведенных в этой главе, вы увидите, как смесь информации и скопление отдельных ощущений становятся восприятием.

Никто не знает, где и когда произойдет несчастный случай. Бригадир по строительству железных дорог Финеас Гейдж, проснувшись однажды сентябрьским утром 1848 года в Вермонте, и помыслить не мог, что в тот же день в результате взрыва динамита трамбовочный стержень длиной метр двадцать пробьет его череп и выйдет наружу с другой стороны. О том, как этот инцидент отразился на личности Гейджа, ходят легенды, и эта история уже обросла мифами. Когда Финеас умер, его череп сохранили и передали в медицинскую библиотеку Фрэнсиса Каунтвея в Гарварде. Череп Гейджа дает современным нейробиологам возможность проанализировать связи в мозге, которые были порваны ломом, и таким образом лучше понять воздействие травмы на те участки мозга, которые могли быть повреждены.

Да и Франц Брэндл, известный науке как Мистер Б., проснувшись майским утром 1926 года в Германии, понятия не имел, что в тот день с лихвой наглотается угарного газа, вырвавшегося из плавильного аппарата, рядом с которым он работал. Следующие несколько месяцев своей жизни он провел в больницах: из-за

недостатка кислорода в мозге у него появились очень странные симптомы. Мистер Б. стал знаменитостью в среде психологов, потому что в результате того несчастного случая у него практически перестала работать кратковременная память.

А выдающийся британский музыкант и музыковед Клайв Уэринг, еще один печальный случай в психологии, проснулся мартовским днем 1986 года в довольно вялом состоянии. Он понятия не имел, что во всем виноват простой вирус герпеса: тот не только проник в его организм, но и порастил центральную нервную систему, разрушив некоторые нервные ткани. В итоге мозг Клайва потерял способность переносить события из кратковременной памяти в долговременную: он помнит все не дольше 7–30 секунд — примерно каждые 20 секунд он «просыпается» и «перезапускает» свое сознание.

И Генри Молисон (также известный как пациент Г. М.), который отправился сентябрьским днем 1953 года в больницу Хартфорда в Коннектикуте, чтобы при помощи операции избавиться от эпилепсии, не подозревал, что проснется без кратковременной памяти. Его нейрохирург, Уильям Сквилл Бичи, провел двустороннюю резекцию медиальной височной доли — операцию прямого соединения левой и правой сторон мозга, нацеленную на предотвращение эпилептических припадков.

За те двести лет, что строение мозга вызывает у человечества интерес, были изучены и описаны сотни случаев, подобных тем, что представлены на рис. 10.1. По счастливому стечению обстоятельств за последние два столетия багаж знаний нейробиологии в области функционирования мозга значительно пополнился. Французские врачи и ученые начала XIX века были одними из самых квалифицированных анатомов своего времени. Их исследования в конце 1800-х годов внесли большой вклад в науку, известную сейчас как нейроанатомия. Кроме того, французы изучали мозг пациентов со случайными (или иногда умышленными) травмами.

На научном собрании в Париже в 1861 году парижский врач Эрнест Обертен представил доклад о неудачной попытке само-



ФИНЕАС ГЕЙДЖ



ЛУИ ВИКТОР ЛЕБОРН



ГЕНРИ МОЛИСОН



КЛАЙВ УЭРИНГ



Рис. 10.1. Финеас Гейдж, Луи Виктор Леборн, Генри Молисон и Клайв Уэринг, срезы мозга Гейджа, Леборна и Молисона, полученные в исследовании 2015 года, проведенном де Шоттеном и его коллегами. Единственная известная фотография Леборна — это фотография его консервированного мозга в банке. В соответствии с данными де Шоттена и др. (2015)

убийства. Обертен был не только врачом, он интересовался работой мозга, в частности связью мозга с языком. Выстрелившего себе в голову месье Каллерье срочно доставили в больницу, где работал Обертен. Ранение было ужасным: пострадала часть черепа Каллерье, и Обертену пришлось ее удалить, в результате чего мозг обнажился. По-видимому, пока врач прилагал усилия по спасению жизни месье, тот был в сознании, потому что сохранял способность разговаривать. Затем Обертен сделал то, что век спустя сделал бы Уайлдер Пенфилд: он поместил хирургический шпатель на область мозга, которая, по его мнению, отвечала за язык и речь, и, надавливая на этот участок, попросил Каллерье говорить. В своем выступлении в Париже Обертен сказал, что речь пациента состояла тогда из «слова, которое начинало раздваиваться». Когда врач ослаблял давление, способность говорить слова нормально возвращалась к Каллерье. Обертен манипулировал частью мозга, которая имела какое-то отношение к речи. К сожалению, Каллерье не пережил событий того дня.

Несколько дней спустя Поль Брока — другой французский врач, присутствовавший на том научном собрании, — посетил своего пациента по имени Луи Виктор Леборн, известного также как Тан (пытаясь говорить, он снова и снова повторял это слово). Леборн провел в больнице большую часть взрослой жизни из-за разных болезней, одна из которых привела к афазии — потере речи. Месье Тан попал под наблюдение Брока из-за гангрены ноги. Увы, врач уже ничего не мог сделать для него, и бедный Леборн умер от инфекции. Памятуя о докладе Обертена, Брока заинтересовался, почему Леборн потерял способность говорить, и при вскрытии разрезал мозг своего несчастного покойного пациента. Брока обнаружил, что мозг Леборна имел повреждение в области заднего конца одной из извилин на левой стороне — в нижней лобной извилине. Два года спустя Брока столкнулся с другим пациентом — неким месье Лелонгом, потерявшим речь после инсульта. Афазия Лелонга была подобна той, что имел Леборн. Вскоре пациент умер, и Брока принялся и за его мозг. Изучив мозг еще нескольких субъектов с аналогичной афазией, врач смог идентифицировать область мозга, которая отвечает за речь. Теперь она носит имя Брока. Через пятнадцать лет после этого немецкий доктор Карл Вернике, также изучивший множество пациентов с афазией, нашел еще одну область мозга (область Вернике), отвечающую за языковое восприятие.

Полю Брока нравилось «консервировать» мозг. За годы своей деятельности он сохранил для исследований мозг 292 мужчин и 140 женщин. Его собственный мозг также был «консервирован» и описан в книге Карла Сагана «Мозг Брока: рассуждения о романсах науки» (*Broca's Brain: Reflections on the Romance of Science*). Сохранившиеся с тех пор образцы мозга и черепов людей с серьезными травмами сейчас изучают с помощью современных методов визуализации мозга. В 2015 году Мишель Тибо де Шоттен и его коллеги исследовали три мозга, о которых я говорил выше, с помощью технологий, которые за последнее десятилетие приобрели большую

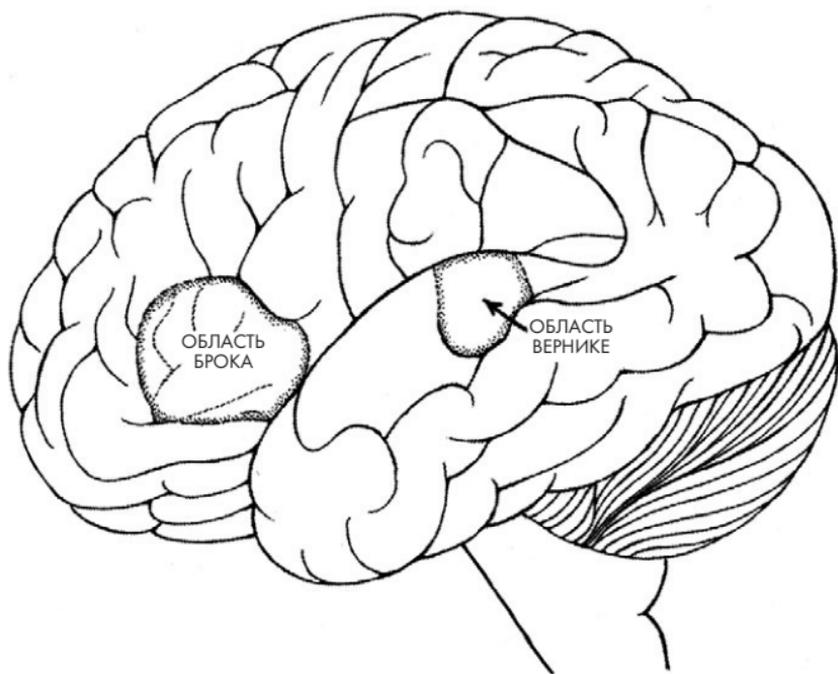


Рис. 10.2. Расположение области Брока и области Вернике

популярность у нейробиологов, — компьютерной томографии (КТ) и магнитно-резонансной томографии (МРТ). Сохраненный в формалине мозг Леборна тоже был визуализирован с помощью МРТ.

Компьютерная томография — это комбинация большого количества независимых рентгеновских снимков, снятых с разных ракурсов. Рентгеновские изображения собираются вместе при помощи компьютерных технологий и составляют общую базу данных, которая может создавать изображения в поперечном сечении. Таким образом, технология позволяет при помощи математического алгоритма, называемого цифровой геометрической обработкой, воспроизводить трехмерные реконструкции внутренних сканируемого объекта. Череп Финеаса Гейджа исследовали с использованием этого подхода, и его давно исчезнувший мозг был реконструирован с помощью компьютерной томографии и данных реального мозга 129 здоровых людей. Идея Тибо де Шоттена и его коллег заключалась в следующем: опираясь на то, как выглядит мозг здорового человека и как он расположен в че-

10.1 | МРТ

Технология МРТ основана на следующем принципе: атомные ядра в молекулах и клетках, помещенных в сильное магнитное поле, поглощают и излучают энергию радиоволн. Причина излучения этих радиоволн — наличие протонов в ядре каждого атома (например, водорода), которые действуют как крошечные магниты. В нормальной ткани ядра расположены случайным образом, но, если изменить направление магнитных полей вокруг ядер, протоны в ядрах также изменят направление и выровняются по магнитному полю. Когда магнитное поле выключается, протоны немедленно возвращаются к своей первоначальной позиции, а количество и направление изменений ядер можно обнаружить по излучению энергии. Эта энергия излучается в виде волн частотой от 3 кГц до 300 МГц (помните, что диапазон человеческого слуха составляет от 20 Гц до 20 кГц) и является областью радиолокационных волн. Энергия, выделяемая в виде электромагнитных волн этого диапазона, фокусируется в антеннах, расположенных вокруг органа, с которого снимаются данные, а компьютер обрабатывает данные об источнике излучения и реконструирует объект. При большем количестве атомов водорода (то есть большем количестве воды) в определенном виде ткани или в определенном месте органа длина излучаемой волны будет отличаться от длины волны, излучаемой из области с меньшим количеством атомов водорода. Таким образом, изображение¹ может быть достаточно детальным и способно дать информацию о таких объектах, как колено, бедро или мозг, без необходимости делать резекцию ткани или операцию.

¹ То, что описывает автор, называется «протонная карта», используемая сейчас достаточно редко. Наиболее часто используются параметры затухания сигнала от ткани, которая может дать информацию о химических различиях (T2 взвешенное изображение) или о том, насколько протоны в составе молекулы связаны с другими молекулами (T1 взвешенное изображение). — *Прим. науч. ред.*

репе, можно сказать, где именно в мозг Гейджа вошел лом. В итоге исследователи смогли восстановить картину и определить, какие нервные пути были повреждены у Гейджа в результате несчастного случая.

Мозг пациента Г. М. исследовали с помощью МРТ более чем за двадцать лет до его смерти, и в 1993 году эти изображения были заархивированы для дальнейшего использования. Кроме того, после смерти Г. М. в 2008 году его мозг был изъят для дальнейшего изучения. Именно тогда Г. М. стал известен как Генри Молисон, потому что медицинские работники не используют имена живых людей в публикациях или дискуссиях. Мозг Молисона законсервировали в желатине, разделив на 2401 тонкий срез, который затем был сохранен криогенным способом для будущих исследований. Каждый срез был впоследствии оцифрован фотографическим способом для создания трехмерного изображения мозга. В настоящее время существует веб-атлас мозга Молисона, который может использоваться в качестве основы для научной деятельности. Взглянуть на эти изображения довольно интересно, особенно понимая, что этот человек своей жизнью (и смертью) внес вклад в наши знания о мозге. Посмотрите на все это сами, и, возможно, вы будете впечатлены мозгом Г. М. так же, как Карл Саган — мозгом Брока.

Де Шоттен и его коллеги удивительно точно воссоздали поражения мозга, от которых пострадали Гейдж, Молисон и Леборн, продемонстрировав возможности данной технологии. Ученые использовали двадцать два основных проводящих пути в мозге, и им удалось определить степень повреждения, ориентируясь на эти точки в трех вариантах мозга. Более ранние работы по изучению черепа Гейджа указывали на сильные повреждения лобной доли коры головного мозга, однако исследование 2015 года скорректировало это грубое наблюдение. Поскольку ученые использовали двадцать два ориентира, чтобы обратить внимание на связи одних частей мозга с другими, они смогли определить, существовали ли еще какие-либо повреждения помимо самых явных и крупных на лобных долях и коре. Из тех связей, что имеют отношение к на-

шему исследованию чувств, у Гейджа на 35 % был нарушен лобный орбитополлярный нервный путь. Этот путь отвечает за передачу слуховых, обонятельных, зрительных и вкусовых данных в память. Вероятнее всего, память Гейджа о его личных «мадленках» была стерта из-за пережитой травмы. Если сравнить три знаменитых мозга, то очевидно, что мозговые связи Молисона, основанные на двадцати двух ориентирах, пострадали меньше других. И это, скорее всего, объясняется точностью перенесенной им операции, которая в конечном итоге привела к нарушению работы памяти. Из протокола операции и МРТ, сделанных в 1993 году, известно, что доктор Сквилл удалил несколько частей мозга, включая медиальную височно-полярную кору, миндалевидное тело, энторинальную кору, некоторую часть зубчатой извилины, гиппокамп и другие небольшие части лимбической системы. Однако работа де Шоттена и его коллег показала, что операция Молисона также затронула шесть связей, которые удалось обнаружить при помощи ориентиров. Одно из этих соединений особенно важно для органов чувств и включает переднюю комиссуру, или спайку. Эта нейронная связь влияет на реакцию обонятельного органа и действительно могла быть задета у Молисона, потому что после операции у него были большие трудности с определением запахов. Результаты двух пройденных им обонятельных тестов были ужасны. Однако Молисон мог определять предметы по их виду, а это значит, что он не потерял память и помнил, что это за вещи; скорее в результате операции он перестал четко распознавать запахи (рис. 10.3). Например, когда ему дали понюхать гвоздику, Молисон сказал, что это «свежеспиленное дерево» при первой попытке пройти тест и «мертвая рыба, выброшенная на берег» — при второй.

Мозг Леборна больше всего пострадал от травмы, полученной в раннем возрасте. Участок поражения включал не только область Брока, но и несколько нейронных путей, связывающих ее с областью Вернике (рис. 10.1). Затронуты были и другие области. Как именно поражение мозга повлияло на поведение Леборна и работу его органов чувств, по большей части неизвестно, потому что

Таблица 8. Определение распространенных запахов пациентом Г. М.

Запах	Тест 1	Тест 2
Кокос	«Мыло»	«Цветы»
Мята	«Цветы»	«Кислота»
Миндаль	«Полевой цветок»	«Кислота»
Лимон	«Цветы»	«Кислота»
Ваниль	«Увядшие розы»	«Свежая бумага»
Апельсин	«Кислота»	«Нестойкие духи»
Гвоздика	«Свежеспеленное дерево»	«Мертвая рыба, выброшенная на берег»
Малина	«Цветы»	«Труп белки»
Роза	«Роза»	«Грязная вода»
Вода	«Ничего не чувствую»	«Ничего не чувствую»

Рис. 10.3. Как Г.М. определил запахи (взято из работы Айхенборна и др. 1983 года)

Брока изначально лечил его от гангрены ноги. Но, учитывая степень поражения передней спайки и почти всех из двадцати двух ориентиров на левой стороне мозга, можно предположить, что «чувственная» жизнь Леборна после травмы была сущим кошмаром. И, чтобы плеснуть еще черной краски на эту невеселую судьбу, добавлю: когда де Шоттен и его коллеги представляют результаты своей работы, они демонстрируют фотографию Гейджа с его знаменитым ломом в руках (и с очень заметной травмой головы) и снимок Молисона, сидящего с кривой улыбкой, а вот единственное сохранившееся изображение Леборна — его мозг, плавающий в банке с формалином.

Так как же нейронные связи, которые мы строим благодаря данным, собранным органами чувств, интегрируют поступившую из множества источников информацию и формируют восприятие внешнего мира? Львиная доля остальной части истории чувств включает в себя мультисенсорную интеграцию, или кроссмодальные взаимодействия. Эти взаимодействия важны для быстрой, точной, а иногда и жизненно необходимой интерпретации сенсорной информации (подробнее об этом в главах 18 и 19).

Эти знаменитые случаи — далеко не все исследования, которые, используя клинико-анатомический метод корреляции, расширили наши знания о черепно-мозговых травмах. Одна из причин того, почему мы столько знаем о травмах мозга и их влиянии на чувства, заключается в том, что мозг находится в неправильном месте нашего организма. Природа жестоко пошутила с нами, и в результате эволюции наш мозг балансирует на тонкой шее далеко от центра тяжести. Это место прямо создано для того, чтобы при потере равновесия и падении с наибольшей вероятностью повредить мозг. В сущности, дело не в том, что мозг «поместили» туда, просто требовалось, чтобы он находился именно там — в голове на плечах. У наших непрямых предков мозг был расположен в более правильном месте: ближе к центру тяжести, ближе к земле. Эволюция нашего вида привела к тому, что мозг (с точки зрения защиты от травмы) оказался в наименее подходящем месте — хуже, наверное, только разве что в ногах. И при этом люди постоянно изобретают новые творческие, трагические и глупые способы подвергнуть мозг опасности. А так как наш мозг предрасположен к травмам, то и наши чувства также подвержены нарушениям. И, как мы уже увидели, изучая травмированный мозг, можно многое узнать о его функционировании и работе чувств. Будет нелишним подробнее рассмотреть два вида травм, являющиеся бичом для современного человека: сотрясение мозга и травму головы на поле боя.

Когда я был в Научном центре Онтарио в Торонто, я зашел в выставочный зал Human Edge, где экспонируется устройство Hockey Helmet Head Hit, предназначенное для тестирования хоккейных шлемов. Кстати, в этот зал можно прийти с детьми — здесь масса любопытных и познавательных штук. Так вот, одна из деталей устройства — огромный красный молоток, готовый ударить по хоккейному шлему на голове манекена. Для имитации столкновения на скорости почти 20 км/ч (обычная скорость хоккеиста на поле) нужно оттянуть молоток назад, отпустить — бац! — и голова манекена содрогается от

удара¹. Дать посетителям помахать огромным молотком со всякими ручками и рычажками — не главная цель представленной забавы: экспонат на примере национального канадского увлечения демонстрирует, насколько уязвимы наши головы. Муляж головы установлен на приборе, который измеряет силу удара молотка. Кроме того, можно выбрать место, куда именно придется удар — сбоку головы или спереди. Несколько ударов по манекену с разной скоростью — и вы осознаете, насколько опасны контактные виды спорта, такие как хоккей, даже если игрок имеет хорошую защиту. Когда я забавлялся с этой штуковиной, я содрогнулся от мысли, каково же пришлось мозгам великих игроков, таких как Горди Хоу или Бобби Орру, до эпохи шлемов в Национальной хоккейной лиге. Нет никаких сомнений, что удары по голове такой силы могут вызвать сотрясение мозга. Многие современные исследования как раз и направлены на изучение сотрясения мозга — его диагностику и влияние на работу органов чувств.

Каждый год во время занятий спортом травмы головного мозга получают примерно три миллиона подростков и взрослых людей. Сотрясение мозга — это лишь один из восьми способов получить черепно-мозговую травму, или ЧМТ, в результате удара головой о движущийся или неподвижный объект. Главный врач спортивной комиссии штата Нью-Йорк и медицинский советник Национальной футбольной лиги (НФЛ) Барри Джордан определяет сотрясение мозга как «сложный патофизиологический процесс, который негативно влияет на мозг и происходит под воздействием травматических биомеханических сил». Сотрясение мозга, полученное при занятиях спортом, постепенно приобретает масштабы эпидемии — пока непризнанной, но уже охватившей те страны, где популярны контактные виды спорта: американский футбол (или, если угодно, австралийский футбол), хоккей, классический футбол, бокс, регби и даже боевые искусства. Многие

¹ При скорости хоккеиста 20 км/ч столкновение может быть уже на скорости 40 км/ч (если двигаются оба игрока).

читатели не понаслышке знают симптомы сотрясения мозга: головокружение, тошнота, головная боль и потеря памяти. Но о природе сотрясения мозга — что это, как и почему оно возникает — пока известно не так много. Ведь удар по голове, подобный тому, что имитирует столкновение на скорости 20 км/ч при краш-тесте в Научном центре Онтарио, может даже и не привести к сотрясению, несмотря на кажущееся впечатление, что любой мозг от такого развалился бы на части.

Поскольку большинство черепно-мозговых травм происходит в результате несчастных случаев, чаще всего их детали неизвестны. Именно поэтому исследования сотрясения мозга сосредоточены главным образом на спортивных травмах. Телевизионные трансляции состязаний по американскому футболу очень популярны, поэтому почти каждое сотрясение мозга в НФЛ за последнее десятилетие было задокументировано. Пересматривая записи, подсчитывая сотрясения у игроков НФЛ и определяя, куда именно пришелся удар, исследователи сделали вывод, что у профессиональных игроков больше всего страдает боковая часть головы. У детей же, играющих в футбол, чаще уязвима макушка. Разница, вероятно, связана с тем, что вместе с квалификацией приходит понимание: лучше не опускать голову для отражения встречного столкновения. Этот урок я усвоил на своем горьком опыте еще в старших классах. Я получил сотрясение мозга в самом начале футбольного матча, когда отчаянно выставил голову навстречу нападающему. Этот случай научил меня держать голову выше и при ударе правильно перемещать центр тяжести, работая всем корпусом. И если для бейсбола я не подошел по физическим данным, то с футболом я завязал сам, когда понял, что мяса на моих костях недостаточно для хорошего удара с помощью центра тяжести. О, и кстати, если вам интересно, боксировал ли я хоть раз и было ли у меня сотрясение мозга, то признаюсь: да, было дело. Раз в жизни. Но соотношение честных ударов и ударов ниже пояса было настолько не в мою пользу, что тренер попросил меня снять перчатки после первой же тренировки. Итак, все мои сотрясения остались в средней школе, но я все еще помню

10.2 | ХАРАКТЕРИСТИКА ЧЕРЕПНО-МОЗГОВОЙ ТРАВМЫ

Существует три способа изучения черепно-мозговой травмы (ЧМТ). Первый — исследование людей, проходящих лечение после черепно-мозговой травмы. Одно из важных условий для изучения ЧМТ заключается в понимании способа получения травмы, а во многих случаях неизвестны точные обстоятельства. Второй подход заключается в использовании манекена, на котором отыгрывается возможная авария, как в Научном центре Онтарио. Подобное устройство называется довольно просто: аппарат для измерения воздействия ударного ускорения на голову. Большинство исследований проводится с использованием манекена, однако некоторые исследователи используют модельные организмы — обычно грызунов. Одно из устройств для такого рода исследований называется FPI (*fluid percussion injury* — устройство, имитирующее травму при помощи жидкости под давлением), с его помощью жидкость быстро впрыскивается в череп животного, имитируя движение жидкости во время травмы головного мозга. Другое устройство называется CCI (*controlled cortical impact*), и в нем контролируется воздействие на кору головного мозга. Похожий аппарат описан в романе (и его экранизации) «Старикам тут не место»¹, где главный герой Антон Чигур использует его для убийства своих жертв. Подопытное животное закреплено в неподвижном положении, а небольшой стержнеобразный аппарат, использующий пневматическое давление, двигает поршень, и стержень погружается в череп и в мозг. Глубина погружения и скорость поршня четко контролируются исследователями. Еще одно устройство основано на методе падающего груза Фини (*Feeney weight drop*): оно контролирует падение веса на череп подопытного грызуна. Существует и разновидность этого устройства — аппарат Мармароу (*Marmarou weight drop*), в нем голову грызуна накрывает небольшой диск, чтобы предотвратить трещину или пролом в черепе. Последний вид исследовательских инструментов связан с изучением воздействия взрывных устройств на военнослужащих в местах военных конфликтов. То есть некоторые из этих устройств имитируют получение травм при взрывах, фактически подрывая грызуна, находящегося внутри их.

¹ Триллер братьев Коэн по одноименному роману Кормака Маккарти. — *Прим. ред.*

их (по крайней мере некоторые из них), и это отнюдь не самые приятные воспоминания.

Когда человек получает сотрясение мозга, под воздействием биомеханической силы, нарушающей нормальное положение головы, происходят вращательные движения мозга внутри черепа. Мозг движется по отношению ко всем костям в голове, за исключением структур лица, таких как хрящи носа. Верхняя ретикулярная формация головного мозга расположена в конце ствола головного мозга рядом с варолиевым мостом. Тот находится в очень закрытой части мозга, встречается у всех позвоночных и содержит несколько нервных кластеров, называемых ядрами, которые несут чрезвычайно важную информацию в мозг и из него. Ядра, проходящие через эту часть мозга, получают импульсы от других областей мозга и передают их им же. Такая архитектура мозга имеет смысл, потому что в конечном счете это древняя его часть, контролирующая самые базовые функции — физиологические и двигательные. Электрические импульсы от зрительного нерва передаются сначала именно сюда, а затем рассеиваются по другим областям. То же самое происходит с сигналами от слуховой системы: их первая остановка обычно как раз в центре мозга, прямо в середине этого кластера нервной ткани. Кроме того, импульсы от тактильных, ноцицептивных и чувствительных к температуре нервов также проходят через эту область. Происходит следующее: биомеханическое воздействие провоцирует обширное движение в головном мозге, который, в свою очередь, привязан к спинному мозгу. Это движение создает крутящий момент на верхней ретикулярной формации, что затем приводит к травме. Часто мозг реагирует на все это кратковременным отключением (то есть человек теряет сознание). Мало того, движение мозга также провоцирует контакт мозга с внутренней частью черепа, когда отражается сила первоначального воздействия. Считается, что это движение мозга вокруг своей оси, и оно вызывает удар мозга о выступы на внутренней стороне черепа, которые обычно в контакт с мозгом не вступают.

Возможно, еще более опасны последствия черепно-мозговой травмы, возникающие позже. Эти вторичные повреждения являются результатом ушиба головного мозга: повреждения его тканей в том месте, где произошел контакт с внутренней частью черепа, и нарушения движения спинномозговой жидкости. Повреждения включают поверхностный ушиб ткани мозга и деформацию головного мозга, произошедшую в момент столкновения с внутренней стороной черепа. Там, где происходит деформация, клетки более подвержены гибели, вследствие чего их функции утрачиваются. Кровеносные сосуды ломаются, из-за чего те нервные клетки, которые они питали, становятся нефункциональными. Физическое повреждение глии и аксонов нейронов (двух видов нервных клеток в головном мозге) вызывает прекращение нервной деятельности в травмированных клетках. И хотя первичная черепно-мозговая травма не вызывает разрыва аксонов, дальнейшее воздействие на их структуру приводит к сильнейшему растяжению аксонов до таких пределов, что нарушается электрохимический процесс. Чтобы справиться с этой проблемой, клетки начинают работать в усиленном режиме, доходят до предела и в конечном итоге «ломаются». С помощью технических средств, таких как компьютерная томография и МРТ, подобные повреждения обнаружить нельзя, поэтому для визуализации повреждения аксонов исследователи используют третье техническое достижение — диффузионно-тензорную томографию (ДТТ). Этот метод довольно информативен, потому что с его помощью видно положение определенных нейронных путей в мозге. Он основан на магнитном резонансе, но, в отличие от МРТ, при которой отображается общая активность в области мозга, ДТТ показывает проходящие через мозг конкретные пути¹. Этот метод в значительной степени

¹ Метод основан на преимущественном направлении диффузии воды в ткани. Вдоль проводящего пути пучка аксонов диффузия почти ничем не ограничена, в то время как поперек пучка она сильно затруднена. Используя эти данные, программа строит вероятностную, но не всегда истинную модель возможного направления пучка аксонов, которое и визуализируется данным методом. — *Прим. науч. ред.*

10.3 | АНАТОМИЯ СПОРТИВНЫХ ТРАВМ МОЗГА

Представьте себе футбольный мяч, приклеенный к концу ручки клюшки для гольфа и помещенный внутрь баскетбольного мяча, при этом внутренняя поверхность баскетбольного мяча не касается внешней стороны футбольного. Если клюшка для гольфа неподвижна, футбольный мяч не контактирует с баскетбольным. Но, если клюшку хорошенько встряхнуть, футбольный мяч начнет биться об стенки баскетбольного. Я хочу сказать, что и мозг при схожих условиях отскакивает как шар в пинболе, но это все же преувеличение: движение мозга ослабляется тем, что он прикреплен к позвоночнику и туловищу. Передняя часть мозга ударяется о переднюю стенку внутри черепа, иногда довольно жестко сталкиваясь с внутренней частью орбитальных гребней (костей, расположенных вокруг глаз), а затем отскакивает обратно. После чего задняя часть мозга бьется о заднюю поверхность внутренней части черепа. Эти ушибы называются повреждением в месте воздействия травмирующего фактора и повреждением от противоудара соответственно.

зависит от компьютерной обработки, и он довольно дорогостоящий. Но он позволяет обнаружить посттравматические разрывы в аксонах.

Многие исследования черепно-мозговых травм проводятся в военном контексте. С 2000 по 2011 год было зарегистрировано более 233 000 случаев ЧМТ среди американских военнослужащих (как мужчин, так и женщин), проходивших службу на Ближнем Востоке. Большинство травм было получено в результате взрывов самодельных и других взрывных устройств. К сожалению, голова очень уязвима при взрывах и стрельбе. Полученные при трагических обстоятельствах военные травмы (помимо миллионов спортивных травм) сделали ЧМТ основным источником данных о том, как травмы влияют на восприятие внешнего мира. Очевидно, что повреждение мозга и травмирование основного пути передачи информации от органов чувств, таких как глаза,

уши, язык и нос, к мозгу влияют на функционирование нервной системы в целом и на то, как мы воспринимаем внешний мир в частности.

Черепно-мозговые травмы влияют на работу почти всех органов чувств. Уже сравнительно давно известно, что в результате сотрясения мозга и более тяжелых видов ЧМТ человек начинает хуже чувствовать запахи. Очевидно, что травмы носа влияют на обоняние, но при черепно-мозговых травмах также возможны повреждения обонятельных луковиц и нейронных путей от луковиц к остальным областям мозга, участвующим в интерпретации запаха, таким как таламус и миндалевидное тело, что отражается на обонятельной способности. Потеря обоняния считается одним из основных признаков возможной черепно-мозговой травмы, который в спорте можно зафиксировать сразу после особенно серьезных падений или ушибов. Но степень точности, с которой утрата обонятельных функций может использоваться для диагностики сотрясения мозга или другой травмы головного мозга, остается спорной. Тем не менее два исследования, проведенные в 2015 году на пациентах с ЧМТ (одно в Австралии и одно в Канаде), показывают, что у 50%, а то и у 66% из них наблюдается обонятельная дисфункция. Почти половина этих пациентов сильно страдает от нарушения обоняния. В США у военнослужащих, перенесших черепно-мозговые травмы после взрывов в Афганистане и Ираке, проверяли остроту обоняния. В результате получилось, что только в 35% случаев можно было соотнести фактическую видимую черепно-мозговую травму с обонятельной дисфункцией. Часть проблемы определения корреляции потери обоняния с черепно-мозговыми травмами заключается в тестах, разработанных для обнаружения этой дисфункции. Инструмент со странным названием Sniffin' Sticks test — один из наиболее популярных тестов, который может показать результаты, отличные от UPSIT-теста, разработанного в Пенсильванском университете.

Только в редких случаях при проблемах с обонянием у пациентов с ЧМТ используется клинико-анатомический корреляционный метод. Но развитие технологии диффузионно-тензорной

томографии может стать важным методом для изучения черепно-мозговых травм и их влияния на проводящие пути головного мозга. У пациентов, перенесших повреждения лобных долей в результате ЧМТ, часто возникают обонятельные и вкусовые галлюцинации, и чаще всего это действительно неприятные запахи или вкусы. Подобная дисфункция подтверждает хорошо известную связь этих двух чувств с лобной долей головного мозга. Наименее всего изучено влияние черепно-мозговых травм и сотрясений мозга на чувство вкуса, но те, кто знаком с сотрясением мозга, вероятно, еще помнят тот металлический привкус во рту. Эта вкусовая галлюцинация называется парагевзией. Чаще всего металлический привкус вызван не дисфункцией вкусовых рецепторов на языке или связей с мозгом, участвующих в восприятии вкуса, а скорее всего, это проявление воздействия на ту область мозга, что отвечает за обоняние. (Здесь есть важный момент, к которому мы вернемся в главе 11, когда будем подробнее разбирать, как чувства взаимодействуют друг с другом.) Полная утрата вкусовой чувствительности (агевзия) в результате черепно-мозговой травмы указывает на некоторую дисфункцию восприятия вкуса как такового.

Осязание тоже плохо изучено в контексте черепно-мозговых травм. Однако известно, что оно тоже страдает при повреждении теменной доли головного мозга. При таких травмах человек испытывает покалывание кожи и другие сенсорные ощущения. Теменная доля — это место, где обрабатываются импульсы от тактильных органов (многих видов сенсорных рецепторных клеток на коже).

Влияние черепно-мозговых травм на зрение изучали на военнослужащих, пострадавших от взрывов. Исследование показало, что при взрывах случаются все виды нарушений зрения, причем при этом довольно распространена дисфункция глазодвигательного нерва. Это моторное явление затрагивает движение глаз и приводит к проблемам с фокусировкой и чтением. Сейчас разрабатывается инструмент диагностики, основанный на компьютерном отслеживании движения глаз, который можно будет использовать при ЧМТ для оценки возможных улучше-

ний зрительной системы у лиц, пострадавших от взрывов, после терапии. Другие симптомы черепно-мозговых травм, затрагивающих органы зрения, относятся к так называемым функциям высшего порядка: чувствительность к свету, нарушение навыка чтения и время реакции на визуальные объекты. Влияние на навык чтения важно, потому что оно предполагает, что проблема не полностью связана с двигательными функциями. Некоторые люди с ЧМТ жалуются, что они постоянно теряют то место в тексте, где читают, и не могут понять прочитанную информацию. Эти симптомы указывают на проблемы интерпретации воспринимаемой глазами информации как на процессы более высокого порядка.

У людей, перенесших сотрясение, иногда наблюдается и потеря слуха, которая в некоторых случаях тоже может использоваться для диагностики повреждений головного мозга. Если проанализировать ЧМТ у военнослужащих, нетрудно представить себе воздействие взрывных устройств на слуховую и вестибулярную системы человека. В одном из первых систематических и всесторонних анализов воздействия взрывов на американских военнослужащих Сара Теодоров и ее коллеги разобрали более восьмисот публикаций, посвященных этой теме. Их результаты показывают, что потеря слуха действительно стала последствием взрывов. Любопытная деталь: потеря слуха у испытуемых неотделима от тиннитуса — постоянного шума в ушах при отсутствии источника звука.

Шум в ушах бывает двух видов. Первый — пульсирующий. Он появляется, когда усиливается сердцебиение и человек слышит стук собственного сердца. Все остальные проявления шума в ушах классифицируются как неппульсирующие. Есть много причин для возникновения каждого из видов тиннитуса, но военнослужащие, подвергшиеся воздействию взрывной волны, страдают от них всех. К ним относятся прямая травма внутреннего уха — перелом височной кости, лабиринтное сотрясение мозга, разрыв костной цепи (молоточек, наковальня и стремечко), а также баротравма (следствие резкого изменения давления воздуха)

и шумовая травма. Кроме того, травма шеи и нервной системы (например, слухового нерва, ведущего к мозгу, или области мозга, участвующей в обработке слуховых сигналов) также приведет к появлению тиннитуса. Как показывают примеры, полученные при помощи диффузионно-тензорной томографии мозга, любая травма сильно затрагивает чувства. Только здоровый мозг обеспечивает правильное сенсорное восприятие, но, к сожалению, очень многие травмы и физические изменения мозга могут привести к сенсорной дисфункции.

СОВРЕМЕННАЯ ЖИЗНЬ: АПОПЛЕКСИЧЕСКИЕ УДАРЫ И ЧУВСТВА

Влияние инсультов и других нарушений головного мозга
на сенсорную способность

В декабре 1999 года у меня был инсульт, и он затронул мою левую сторону — мои пальцы.

Джонни Гимбл, скрипач,
играющий западный свинг

Какие конкретные физические повреждения угрожают слуху и вестибулярному аппарату? При взрыве ударная волна попадает из наружного уха во внутреннее и проходит через полость среднего уха и барабанную перепонку. Перепонка — тонкая пленка, отделяющая среднее ухо от внутреннего, — первая структура, которую своим воздействием заставляют вибрировать приходящие из внешнего мира звуковые волны. Тогда и запускается вся хитроумная конструкция внутреннего уха. Иногда сильное давление внешней среды или сила звуковых волн может привести к тому, что эта тонкая пленка рвется или в ней образуются дырки. Барабанная перепонка ведет себя очень похоже на продырявленный чересчур рьяным ударником малый барабан (на ум сразу же приходит уничтоживший сотни барабанных установок покойный Кит Мун из The Who): вибраций больше нет, нет и звука. Кроме того, под угрозой оказываются и стереоцилии, которые выравнивают внутреннее ухо и вибрируют под воздействием звуковых волн.

Изгиб этих крошечных волосков вызывает реакции внутри слуховых нервных клеток, и сигналы, которые эти клетки посылают в мозг, регулируются посредством нейронной петли, в кото-

рой обратная связь от мозга корректирует поступающую информацию. Эффект похож на тот, что мы наблюдаем, когда гитара расположена слишком близко к усилителю: если мозг не регулирует цикл, возникнет положительная обратная связь и нежелательные звуки усилятся. Обратная связь вызвана колебаниями стереоцилий, и такие колебания во внутреннем ухе могут привести к тиннитусу (см. главу 10). Взрывная волна может сломать волоски и убить клетки стереоцилий — это еще один способ нарушить обратную связь во внутреннем ухе, в результате чего и появляется шум в ушах. Сами рецепторные клетки можно повредить очень сильным звуком или давлением. Определенные клетки чувствительны к определенной длине волны и не способны к регенерации, поэтому их восстановление после повреждения или уничтожения невозможно, что приводит к невосприимчивости звуковых волн некоторой длины. Кроме того, прекращение работы рецепторных клеток означает, что какая-то поступающая в них информация будет пропущена и в дополнение к отсутствию слуха на определенных длинах волн это вызовет еще и шум в ушах. И посторонние звуки в этом случае возникают именно из-за этого нарушения и существуют только в голове того, кто их слышит.

Слух нарушается не только от взрывной волны или сотрясения мозга, но и от негативного воздействия звуковых волн другой длины. Мы уже обсуждали самые громкие спортивные стадионы в мире (см. главу 7), но и в повседневной жизни мы то и дело сталкиваемся с шумом — акустическим фоном окружающей среды. Это шум, про который наши предки даже 500 лет назад не знали ничего. Каждый день мы слышим работающие блендеры, кофемолки, автомобили, телевизоры, сирены и звонящие телефоны, которые 150, 100 да и 50 лет назад просто не существовали. Есть и современные звуки, характерные для профессиональной деятельности человека: рев взлетающего самолета, визг работающей дрели или вой бензопилы, грохот на заводе и скрежет тормозов поезда метро. Шум сопровождает и некоторые виды досуга, например рев гоночных автомобилей на ралли или грохот группы The Who в наушниках. И раз уж зашел разговор об этой рок-группе, нелишним

будет упомянуть, что именно оглушающие неординарные концерты принесли им такой зрительский успех. Только вот трое из четырех участников первого состава — Пит Таунсенд, Роджер Долтри и Джон Энтвисл — потеряли слух из-за воздействия собственной музыки. Про слух четвертого члена группы — барабанщика Кита Муна — ничего выяснить не успели, поскольку тот умер в тридцать два года от передозировки лекарственного препарата.

Если бы длительность всех этих современных звуков, с которыми мы постоянно сталкиваемся, составляла несколько секунд, то только от измеряемой в децибелах силы звука зависело бы, вызовет ли это воздействие травматическую потерю слуха, временное нарушение слуха или можно считать этот звук безопасным. Однако, по мнению Бориса Гуревича и его коллег, повреждение слуха вызывается не только громкостью звука, но и длительностью его воздействия на человека. Чтобы оценить влияние конкретных современных звуков на слух, нужно вычислить так называемый Лэkv (*Leq*) — эквивалент уровня непрерывного шума для различных источников звука.

Этот метод количественной оценки звуков, которые мы слышим в повседневной жизни, основан на децибелах, производимых звуком, и среднем времени, в течение которого человек подвергается воздействию каждого вида шума. Звук у блендеров и электрических дрелей прерывистый, но дрели — мощнее и громче, поэтому их Лэkv будет выше. Две минуты шума блендера даже близко нельзя сопоставить с Лэkv дрели в течение восьми секунд. Лэkv работы блендера в течение пяти минут считается безопасным, а шум электрической дрели за это же время считается угрозой для здоровья и может привести к временной потере слуха. Шумные стадионы (например, стадион Эрроухед во время игры команды «Канзас-Сити Чифс»), о которых мы говорили в главе 7, имеют Лэkv, который считается травматичным, и, если подвергаться воздействию подобного шума длительное время, это может привести к постоянной потере слуха. И наушники, которые грузчики надевают на летном поле любого аэропорта, предназначены отнюдь не для прослушивания музыки,

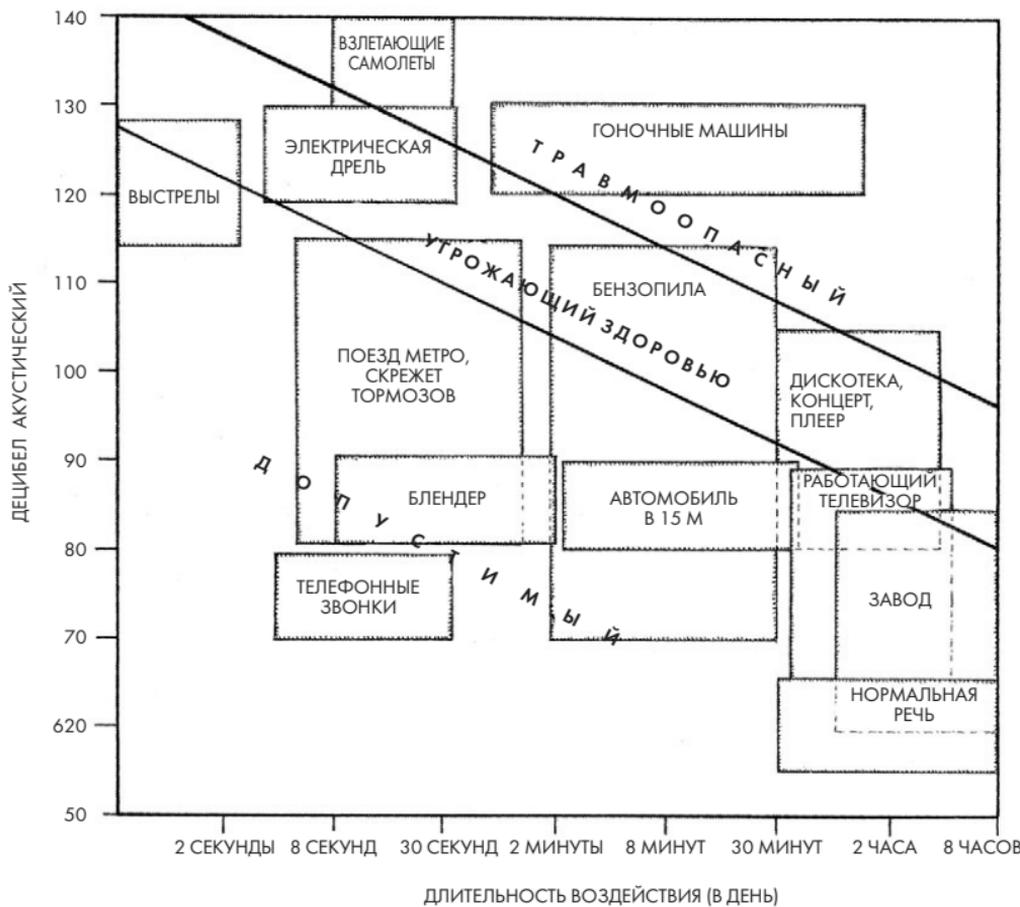


Рис. 11.1. Звуки в повседневной жизни и $L_{экв}$ (эквивалент уровня непрерывного шума)

а для защиты от самого громкого повседневного профессионального шума, которому подвергаются современные люди, — рева реактивного двигателя.

Шум на рабочем месте в лучшем случае раздражает, а в худшем может быть опасным. Согласно большинству нормативов, на производствах по всему миру уровень шума в 80 дБ в течение полного рабочего дня приемлем и «считается безопасным». Это все равно что такое длительное время слушать шум автомобилей на оживленной трассе, стоя примерно в пятнадцати метрах от дороги. Такой уровень шума в течение указанного периода не должен вызывать повреждения стереоцилий внутреннего уха или слуховых нервных путей и, следовательно, считается безопас-

ным. Действительно, когда крысы подвергаются воздействиям шума, по уровню эквивалентным тем, которые находятся в рамках стандартов, исследователи не видят у них повреждения волосков внутреннего уха. Однако Гуревич и его коллеги поставили под сомнение царившую ранее уверенность в том, что длительное воздействие высоких децибелов звука не представляет опасности.

Исследования подопытных животных подтверждают эти сомнения. Тридцатидневное воздействие на крыс звуком на уровне 70 дБ (то есть значительно ниже уровня звука, считающегося опасным) привело к серьезному повреждению нервных путей их первичной слуховой коры. Подопытные крысы не различали звуки, близкие по частоте, которые распознавали крысы, не подвергавшиеся подобному воздействию. Выводы показывают, что шум на уровне 80 дБ в течение длительного периода времени негативно влияет на коммуникации слуховой системы. Эта перенастройка нейронных связей представляет собой результат пластичности мозга.

Пластичность нейронных путей мозга — хорошо известное явление, и она подтверждается примером людей, перенесших инсульт. Инсульт вызывает повреждение тканей и нервных клеток мозга и последующую потерю сенсорной, языковой или двигательной способности, которую контролировали поврежденные части. Однако из-за пластичности мозга и способности образовывать новые нейронные связи вместо утраченных иногда после инсульта удается восстановить потерянные функции, прибегнув к специальной терапии. И наоборот, при длительном воздействии звука мозг пытается справиться с поступающей информацией и из-за пластичности делает все возможное, чтобы перестроить нейронные связи под воздействием потрясений внешнего мира, что затем и вызывает повреждение.

Почему бы не воспользоваться этой пластичностью и не использовать продолжительный звук контролируемым образом, чтобы научить слышать заново людей, частично утративших эту способность? В 2006 году Арно Норена и Джос Эггермонт, зная, что длительное звуковое воздействие на высоких децибелах мо-

жет реорганизовать схему корковых связей, имеющих отношение к слуху, предложили применить этот принцип с пользой. Они подвергли кошек травматическому уровню шума, что привело к потере слуха у животных. После этого ученые разделили кошек на группы, поместив одну в более активную акустическую среду, а другую — в спокойную. Это все равно что одних людей посадить в плацкартный вагон поезда, а других — в СВ. Что удивительно, группа кошек, находящихся в богатой звуками среде, имела более низкие показатели потери слуха, чем кошки из «мягкого вагона».

Шум в ушах возникает не только после черепно-мозговых травм (не важно каких: спортивных, военных или других), он мучит и людей, с виду вполне здоровых. Считается, что тиннитус встречается у 15% населения Земли, а ведь он может серьезно дезориентировать и омрачать жизнь человека. Исследователи искали способы облегчить состояние людей, страдающих от шума в ушах, и пришли к выводу, что, возможно, лучшей терапией является психотерапевтическое консультирование — своеобразный подход, называемый психообразованием. Уже после того, как Норена и Эггермонт в 2006 году предложили звуковую терапию, было совершено несколько успешных попыток применить подобные подходы. Лучшие способы лечения включают комбинации разных методов, в частности шумотерапию в сочетании с каким-либо другим видом стимуляции мозга. В опытах с крысами важным компонентом подобной комплексной терапии была ориентация на работу с блуждающим нервом. Стимулирование этого нерва в сочетании со звуковой терапией может привести к значительному улучшению состояния людей с шумом в ушах. Благодаря стимуляции блуждающего нерва кора головного мозга становится пластичнее, а звук как раз и есть то, что перестраивает связи в мозге. Стимуляция осуществляется с помощью процесса, называемого транскраниальной магнитной стимуляцией (ТМС). Если коротко, этот метод лечения включает в себя целенаправленное воздействие на области мозга магнитным полем. В этой процедуре повторяются звуки, перемежающиеся с короткими импульсами ТМС.

Еще один пример пластичности мозга касается инсультов. Если у вас или у кого-то из ваших родственников или друзей был инсульт, вы знаете: последствия для двигательных и речевых навыков могут быть катастрофическими. Инсульт — это сложные повреждения головного мозга, которые ежегодно получают более миллиона американцев. Нервные клетки мозга не самодостаточны, для работы им необходимо кровоснабжение. Есть два вида инсульта, но оба они вызывают гибель нервных клеток и сильное повреждение нервной ткани в местах, где происходит нарушение кровоснабжения.

Ишемический инсульт случается, когда питающий определенные области мозга кровоток сокращается до уровня ниже, чем необходимо для выживания клеток (рис. 11.2). Такие инсульты локализуются в областях мозга с ограниченным кровоснабжением. Сгустки крови в головном мозге, эмболии (закупорки сосудов) в других частях тела и анафилактический шок — все это уменьшает количество крови, питающее различные области мозга, и вызывает ишемический инсульт. Геморрагический инсульт возникает, когда кровеносный сосуд разрывается и кровь проливается в ткани головного мозга. По лопнувшим сосудам кровь больше не доходит в те участки мозга, куда доставлялась раньше, и нехватка крови приводит к инсульту. Ишемическое повреждение может быть довольно сильным, но пораженные клетки при этом не обязательно гибнут. Когда сами нервные клетки погибают, они, как говорят, подвергаются инфаркту. Ишемически пораженные области мозга способны восстановиться, а инфарктные — нет. Если говорить более конкретно, то недостаток кровоснабжения при ишемическом инсульте локализуется в области, называемой ядром ишемического инсульта. Это ядро обычно представляет собой небольшой участок нервной ткани вокруг поврежденных кровеносных сосудов. Вокруг ядра ишемического инсульта расположена вторично поврежденная область, называемая зоной ишемической полутени. Эта область также повреждена, но не в такой степени, как ядро.

Для распознавания поврежденных областей мозга при любом виде инсульта требуется использование методов визуализа-

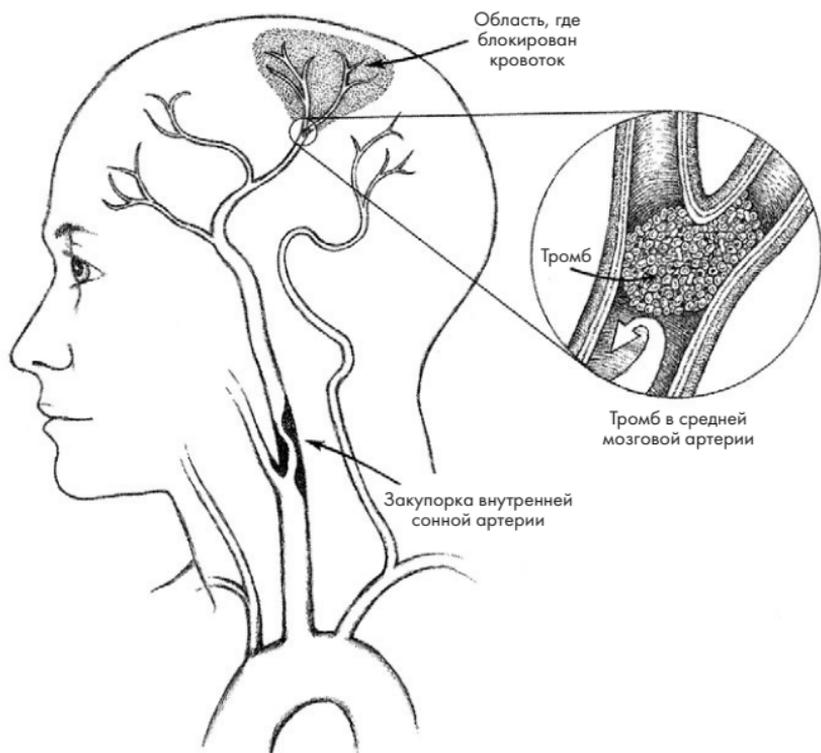


Рис. 11.2. Ишемический инсульт и повреждения головного мозга

ции мозга. Ядро инсульта диагностируется с помощью метода, называемого диффузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографией. Эта методика основана на МРТ, но при этом общую картину строят, учитывая данные, полученные из диффузии воды. Таким способом можно обнаружить тормозящие кровь ткани и, следовательно, определить местоположение ишемического ядра. Полутень идентифицируется с помощью перфузионно-взвешенной магнитно-резонансной томографии. Перед исследованием по этой методике пациенту вводят химическое вещество гандолий, а затем определяют его локализацию с помощью МРТ. Гандолий — контрастное вещество, которое может быть использовано для идентификации областей мозга, где находится более слабый сигнал полутени. Третья область, которая образуется после инсульта, называется доброкачественной олигемией, и в ней существуют только небольшие повреждения инфарктного характера. Эта область не опасна (как и следует из

ее названия) и идентифицируется с помощью описанных выше методов визуализации мозга. Обсуждаемые ишемические и геморрагические инсульты приводят к долгосрочным повреждениям областей мозга, но есть еще инсульты, после которых можно восстановить организм, — так называемые микроинсульты. Они происходят, когда на мгновение или на короткий промежуток времени возникает скопление крови в определенной части мозга. Кратковременная остановка кровоснабжения определенного участка может привести к временной потере чувств, двигательных навыков или даже речи. Когда пострадавшая область пополняет запасы крови, восстанавливается большая часть функций нейронных тканей (или даже все), которые были затронуты микроинсультом. Многие из вас, возможно, слышали довольно грубое определение — мозговой глюк (на самом деле он есть даже в Оксфордском словаре английского языка). Мозговой глюк — это просто кратковременное и временное нарушение функции мозга, обычно связанное с потерей памяти. Хотя это не точный медицинский термин, я думаю, что он вполне точно описывает, что такое микроинсульт.

Симптомы всех инсультов схожи и влияют на двигательные навыки, обработку сенсорной информации и наиболее сильно — на речь. Шум в ушах и потеря слуха являются результатом некоторых инсультов, затрагивающих слуховую кору головного мозга. Слуховая кора локализуется в височной доле головного мозга, поэтому, если инсульт поражает эту область, существует высокая вероятность и того, что будет затронут слух. Наверняка вы догадались, что инсульт может коснуться и чувства равновесия, ведь оно определяется информацией, поступающей из органа, расположенного во внутреннем ухе. На самом деле проблема потери равновесия при инсульте так же сложна, как и само равновесие, и совсем не потому, что из вестибулярного аппарата поступает некорректная информация. Равновесие — это то, как именно мы ощущаем свое тело в пространстве (вестибулярный аппарат внутреннего уха совершает для этого много расчетов), и то, как мы ощущаем движения мышц и мышечное напряжение (эта ин-

формация не обрабатывается вестибулярным аппаратом). Повреждение двигательной системы после инсульта может привести к тому, что человек будет двигаться рывками, и это будет мешать ему поддерживать равновесие. Инсульт может вызвать потерю чувствительности на стороне тела, противоположной поврежденной стороне мозга, из-за чего развивается общее пространственное игнорирование. Зрение тоже необходимо для поддержания равновесия, и часто оно сильно страдает от инсульта.

Инсульты влияют на зрение, потому что большинство из них происходит вблизи тех областей мозга, что отвечают за обработку визуальной информации. Снижение зрения и двоение в глазах — два основных визуальных симптома инсульта. Снижение зрения — результат инсульта, повреждающего зрительную нервную систему, и такой исход весьма вероятен, поскольку зрительные нервы довольно длинные и проходят от глаз к задней части мозга (затылочной доле) и далее к затылочной коре. Глазные нервы, отходящие от каждого глаза, пересекаются в среднем мозге, в точке, которая называется оптической хиазмой. Если пострадавшая от инсульта область затрагивает зрительные нервы перед хиазмой, то любое повреждение правой (или левой) стороны нервов приведет к потере зрения правого (или левого) глаза. При этом если повреждение происходит после хиазмы (то есть ближе к задней части мозга), то картина меняется на противоположную¹. Повреждение правого зрительного нерва приведет к отсутствию передачи информации от левого глаза, и наоборот. Во всех этих случаях сильно страдает поле зрения. Но повреждение зрительных нервов — не единственная причина потери зрения при инсульте. Повреждение может произойти

¹ Перекрест зрительных нервов в хиазме у человека неполный (рис. 13.1). Это означает, что на другую сторону переходят не все волокна зрительного нерва, а только те, которые иннервируют половину зрительного поля каждого глаза. Таким образом, если поврежден зрительный нерв перед хиазмой, наступает слепота на один глаз; если после хиазмы человек способен видеть обоими глазами, то только одну половину поля зрения. — *Прим. науч. ред.*

и в областях мозга, отвечающих за моторную функцию, и двоение в глазах тому пример. Двигательные области управляют мышцами ног, рук и даже глаз. Двоение в глазах вызвано повреждением двигательных нервов, контролирующих движение глаз. Поскольку мышцы не могут приказать глазам выровняться для стереовидения, то возникает косоглазие и появляется двойное изображение.

До сих пор я рассказывал о повреждениях зрительной системы, связанных с нарушением транспортировки первичной зрительной информации в мозг. Другие проблемы могут возникнуть при повреждении нервов, участвующих в интерпретации зрительной информации более высокого порядка. В этой категории может возникнуть целый ряд осложнений. О том, что такое расщепление мозолистого тела, мы поговорим в главе 12, а пока давайте обсудим четыре основные проблемы, связанные с тем, как мы реагируем на визуальные сигналы, как мы читаем и пишем, используя зрение. Когда мы пишем и читаем, зрительная система работает очень хитро, потеря способности читать (алексия) и способности писать (аграфия) иногда становится последствием инсульта. Изначально именно локализация поврежденных инсультом частей мозга у людей с аграфическим и алексическим синдромом помогла определить участвующие в чтении и письме области. Но последние данные свидетельствуют о том, что обе эти функции задействуют гораздо больше областей мозга, и сейчас для их локализации вместо клинико-анатомического метода корреляции используют методы МРТ.

Как еще один результат воздействия инсульта на зрительные процессы высшего порядка возникает явление, называемое пространственным игнорированием. Хотя люди с этим синдромом видят все поле зрения, их мозг просто не обрабатывает некоторую информацию. Пространственное игнорирование обычно развивается с одной стороны, при этом инсульт на левой стороне мозга приведет к выявлению феномена в зрительном поле справа. С пространственным игнорированием связана агнозия, при которой визуальные сигналы обрабатываются полностью че-

рез высшие процессы, но больной не может распознавать людей или вещи, которые видит. Это случается из-за нарушения связи зрительной системы с теми участками мозга, где происходит интерпретация зрительной информации, в результате человек, у которого пострадали эти области мозга, не способен завершить визуальный процесс распознавания объектов и людей. Как ни странно, на восприятие цвета инсульт, похоже, не сильно влияет. Фактически цвет используется в реабилитации некоторых пациентов, перенесших инсульт и страдающих алексией. При алексии нарушается распознавание поля при чтении, поэтому цветные маркеры часто помещаются в начале строки, чтобы помочь больному определить, где находятся поля и начинается новая строка.

Запах и вкус у переживших инсульт людей тоже изменяются в результате повреждения областей мозга, где обрабатывается информация от вкусовых и обонятельных рецепторов. Но о воздействии на эти два чувства известно меньше. К слову, потеря обоняния и вкуса не считается классическим симптомом инсульта. Опять же, как и со зрением, оба этих чувства посылают импульсы, которые доставляются в мозг по двум специфичным наборам нервов. Инсульт может повредить нервы, идущие к мозгу, а также может повлиять на более высокую обработку запахов и вкусов. Другими словами, у человека может ухудшиться способность распознавания объектов, и тот перестает узнавать запах, даже понюхав что-то очень привычное. На первый взгляд потеря вкуса не слишком уж большая проблема — с этим вполне можно жить, но на качество жизни это все же влияет. Как и на рацион человека. В современном мире еда имеет и социальный контекст, поэтому потеря вкуса не может не сказаться на семейной жизни, в которой совместные обеды и ужины играют большую роль. Кроме того, перенесший инсульт человек перестает получать удовольствие от еды и в результате теряет вес. Наконец, любой вкус, который воспринимает человек после инсульта, лучше всего описывается словами «гадкий» и «неаппетитный» — вроде металлического привкуса, который ощущают жертвы травм головного

мозга при дегустации любых продуктов. Чтобы компенсировать такое восприятие и скрыть вызванный повреждением мозга неприятный вкус, люди после инсульта, как известно, сильно солят или сластят свою пищу. Только вот избыточное потребление соли и сахара — не самая правильная стратегия для поддержки здоровья после инсульта.

Инсульт и физические повреждения — не единственные способы изменить состояние мозга. При развитии плода могут возникать аномалии, которые варьируются от анэнцефалии (недостаточного развития всего мозга) до *spina bifida* — расщепленного позвоночника (неполного закрытия позвоночника и мембраны вокруг позвоночного столба). С точки зрения понимания работы органов чувств очень полезно рассмотреть эти и другие проблемы, связанные со структурой мозга.

МОЗГ: ЦЕЛЫЙ/ПОЛОВИНЧАТЫЙ/ РАСЩЕПЛЕННЫЙ

Люди с уникальным мозгом

Все сводится к тому, что в современном обществе дискриминируют правое полушарие.

РОДЖЕР УОЛКОТТ СПЕРРИ, нейробиолог

Можно ли жить с неполным мозгом? Мы уже обсуждали случаи, когда для предотвращения эпилептических припадков часть мозга удаляется хирургическим путем и это не приводит к полной потере нейронной деятельности. После подобных операций здоровье пациентов улучшается, а их мозг продолжает функционировать. Но иногда удаление частей мозга может привести к катастрофе, как в случае с Генри Молисоном (пациентом Г. М.). После удаления внутренней части мозга он действительно избавился от эпилептических припадков, но при этом потерял кратковременную память и частично сенсорное восприятие. Анэнцефалия (врожденное отсутствие головного мозга) фатальна для плода, а вот при гемимегалэнцефалии, приводящей к непропорциональному развитию полушарий головного мозга, шанс на выживание плода довольно высок. В крайне выраженных случаях гемимегалэнцефалии одно полушарие так сильно уменьшено, что у человека буквально остается половина мозга. Однако такие люди живут относительно нормальной жизнью.

Для того чтобы остановить серьезные случаи эпилепсии, иногда удаляют одно из полушарий; эта операция называется

12.1 | ГЕМИСФЕРЭКТОМИЯ

Эта операция — экстремальная версия той, что была сделана Генри Молисон. Безусловно, врачи не делали бы ее, если бы она не давала положительный результат. Обычно гемисферэктомию проводят детям младше двух лет, которые не реагируют на повторное медикаментозное лечение эпилепсии. Предпочтительнее делать эту операцию детям именно такого возраста из-за свойственной им пластичности мозга. Обширные нарушения работы мозга путем удаления его половины можно компенсировать путем перестройки нервной системы по мере развития ребенка. Такие дети ведут нормальную, если не сказать исключительную жизнь. Операцию можно провести как на правом, так и на левом полушарии головного мозга. Некоторые гемисферэктоми, называемые анатомическими, предполагают полное удаление полушария. Альтернативой этой радикальной операции служит функциональная гемисферэктомия, при которой удаляются определенные части мозга, такие как височная доля, и отсекается мозолистое тело. Мозолистое тело играет важную роль в проявлениях особенностей при расщеплении мозга. Случайные и операционные нарушения целостности обоих полушарий дают исследователям и врачам возможность применения метода клинико-анатомической корреляции к изучению односторонности мозга.

гемисферэктомией. Долгосрочные наблюдения за людьми, родившимися без одного полушария головного мозга, а также за перенесшими гемисферэктомию пациентами (в том числе детьми) показывают, что серьезному воздействию подвергается зрительная система. Ахсан Муса и его коллеги исследовали большое количество детей после гемисферэктомии (см. вставку 12.1). После операций в среднем прошло около шести лет, то есть было достаточно времени на то, чтобы у пациентов проявилась пластичность мозга. Сразу после гемисферэктомии зрение пострадало у всех, но последующие наблюдения показали, что у 75%

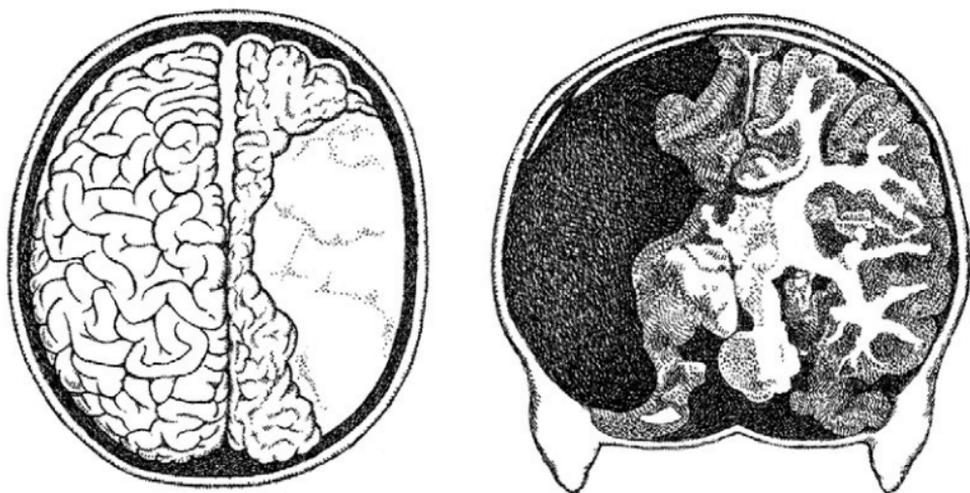


Рис. 12.1. Слева — мозг человека с отсутствующим левым полушарием, вид сверху; область белого цвета — это немозговая ткань и жидкость. Справа — изображение мозга человека с гемисферэктомией, вид сзади черепа

детей оно восстановилось. То есть можно сделать вывод, что зрительная система достаточно пластична и может скорректировать свою работу. Тематические исследования этот вывод подтвердили. Ученые отмечают, что отвечающие за зрение области мозга (причем той самой его половины, что осталась после гемисферэктомии или при врожденной гемимегалэнцефалии) с возрастом увеличиваются. Другие чувства, такие как обоняние и равновесие, тоже могут быть затронуты, но, как и в случае инсульта, они не сфокусированы ни на каких деталях. При гемисферэктомии и гемимегалэнцефалии страдают также речь и способность читать (рис. 12.1).

Повреждения головного мозга (после инсульта, операции или несчастного случая) показывают, как именно каждая сторона мозга влияет на работу противоположной стороны организма. Понимание некоторых нюансов такой односторонности очевидно при воздействии инсульта на зрение и моторику. Если повреждена левая сторона мозга, то нарушается функция правой стороны. Например, если мы вернемся к современному анализу мозга Леборна, то увидим, что все повреждения мозговых связей, которые вызывали его проблемы, были локализованы на левой стороне.

Обширное поражение левой стороны мозга оставило ему для использования только одно слово («тан») как функцию правой стороны мозга.

Все аномалии речи называются афазиями. Пронзительное чувство вызывает чтение расшифровки видеозаписи Джека, пожилого джентльмена с поврежденной областью Брока. Очевидно, что Джек действительно знает, что хочет сказать, но ему тяжело, как же ему тяжело произнести слова... И тут уже не важно, отвечают они на вопрос или нет. Обратите внимание, что речь заторможена и слова выговариваются с большим трудом, что характерно для людей с таким видом афазии.

Интервьюер. Что вы делали, чтобы справиться с болью?

Джек. Э... дом. (Пауза.) Э... врач. (Пауза.) И ноги. (Пауза.) Ходить. (Пауза.) Нехорошо.

Люди с афазией, вызванной повреждением области Вернике, которая обычно расположена в левой части мозга, говорят бегло, но не могут связать слова правильно. В отличие от афазии при повреждении области Брока, когда речь сильно заторможена, афазия, связанная с областью Вернике, приводит к тому, что человек перестает распознавать то, что сходит с его уст. Вот пример джентльмена по имени Байрон, у которого как раз такой вид афазии.

Интервьюер. Привет, Байрон. Как дела?

Байрон. Я счастлив. Вы красивы? Выглядите хорошо.

Интервьюер. Чем ты занят сегодня?

Байрон. В данный момент мы были здесь с водой и говорили с людьми для них там, они ныряют сейчас.

Психологи называют ответы Байрона «словесной окрошкой», потому что это просто поток слов, обычно не связанный с запросом и не несущий определенной мысли. У Джека получалось отреагировать на вопрос интервьюера, а у Байрона — нет. Есть

причина, почему я привел в пример этих двух пожилых мужчин. У женщин реже встречаются подобные виды афазии, поскольку они могут использовать речевые области, расположенные в обеих сторонах мозга. На первый взгляд описываемые здесь явления не имеют никакого отношения к чувствам, но на самом деле все совсем наоборот. Язык, речь и письмо представляют собой своего рода синтез чувств, а функционирование мозга на более высоком уровне, которое как раз включает речь и чтение, представляет собой сложные процессы, эти чувства задействующие. Обработка сигналов, поступающих от органов зрения, обоняния, вкуса и других органов чувств, так же сложна, как и язык.

Брока и Вернике были одними из первых исследователей областей мозга в конце XIX века, а кульминацией их усилий стала работа Роджера Уолкотта Сперри — лауреата Нобелевской премии 1981 года. Награду ученый получил почти через двадцать лет после того, как в 1960-х годах завершил свою основополагающую работу по изучению односторонности мозга. И хотя Брока, Вернике и другие признали локализацию функций в определенных областях мозга, Сперри удалось вывести теорию о различных функциях правого и левого полушарий. Сперри и его младший коллега Майкл Газзанига работали с эпилептиками, которым требовалась операция, потому что те не реагировали на медикаментозное лечение. Люди с расщепленным мозгом подвергаются операции, в ходе которой разрывается связь между левой и правой сторонами мозга. Дело в том, что эпилепсия в некоторых случаях вызвана гиперсвязанностью левой и правой сторон мозга. Когда мозолистое тело (область мозга, соединяющая правое и левое полушария) хирургически расщепляется, проводящие пути от одной стороны мозга к другой разрываются. Поскольку связь между левым и правым полушарием нарушена, эпилептические припадки прекращаются. Однако, несмотря на то что операция помогает остановить приступы эпилепсии, она приводит к некоторым странным эффектам, наблюдаемым у пациентов.

Левая и правая половины мозга должны взаимодействовать, чтобы правильно воспринимать поступающую из внешнего мира

информацию. Исключениями из этого правила, как было отмечено, являются пациенты с гемимегалэнцефалией или перенесшие гемисферэктомию. Одним из неожиданных результатов операций по расщеплению мозга стало очень важное открытие Сперри: он определил, что каждое из двух полушарий головного мозга выполняет свои подзадачи, но часто для выполнения каких-либо сложных функций оба полушария объединяют усилия. Одна из таких функций — интерпретация поступающей из внешнего мира информации. После операции по расщеплению мозга обе его половины продолжают выполнять свои нейронные задачи, такие как сбор визуальной, обонятельной, слуховой и другой информации. Но теперь левые и правые полушария не связаны, поэтому левая часть не знает, что делает правая, и наоборот. Поскольку поведение пациентов с расщепленным мозгом очень выделяется, Сперри удалось вывести несколько важных положений относительно работы левого и правого полушарий. Прежде всего стоит рассуждать не о правом и левом полушарии, а о доминирующей части мозга и второй, недоминирующей. У большинства людей доминирующее полушарие — левое. Далее Сперри пришел к выводу, что доминирующая сторона (то есть чаще всего левая) отвечает за решение аналитических задач и вербальных, например за использование языка. Недоминирующая (обычно правая) считается ответственной за эмоциональные и некоторые невербальные функции. Такие функции, как творчество, тоже приписали к этой стороне мозга, но, скорее всего, они вообще не контролируются полушариями.

Еще один вопрос, который нужно рассмотреть в этом контексте, — разница между мозгом мужчин и женщин. Было принято считать, что доминирующая часть мозга была женской, а недоминирующая — мужской. Это объясняли тем, что женщины более вербальны, а мужчины лучше пространственно ориентированы. Однако, согласно последним исследованиям мозга мужчин и женщин, такое представление ошибочно. Разница между мужским мозгом и женским заключается в том, как связаны полушария. Мадера Ингаликар и ее коллеги рассмотрели мозг примерно

тысячи молодых людей, среди которых было примерно поровну юношей и девушек. С помощью диффузно-тензорной томографии исследователи получили карту связей развивающегося мозга. Результаты показывают, что у юношей присутствует больше связей внутри полушарий, а у девушек — между полушариями конечного мозга.

Это означает, что полушария головного мозга женщин больше «общаются» между собой, чем у мужчин. Однако есть сильная разница в связях между двумя половинами мозжечка у мужчин и женщин. У мужчин больше перекрестных связей, ведущих от левой части мозжечка к правой. Не забывайте, что головной мозг выполняет функции более высокого порядка и в целом контролирует движение мышц и координацию. Некоторые исследователи, опираясь на общие наблюдения, считают, что мужской мир зиждется на двигательных навыках. А женский мир, как следует из рассуждений, основан на интуиции и общении. Конечно, следует избегать такого рода обобщений, но подобная разница в количестве нейронных связей интригует.

Что касается чувств, то доминирующая сторона мозга обычно лучше выражает то, что воспринимает мозг. Одно из самых любимых занятий человеческого мозга — вербализация, о чем свидетельствует наша склонность говорить все и ничего. Недоминирующая сторона мозга куда лучше понимает и анализирует информацию. Если информация подразумевает эмоциональный аспект, то им также занимается недоминирующая сторона. Важнейший вывод по поводу человеческого мозга состоит в том, что тот имеет двойственную природу, и Сперри безусловно достоин Нобелевской премии за свое открытие. Его студент Майкл Газзанига, вероятно, тоже заслуживал Нобелевку за то, что довел работу до удивительных и логичных крайностей. Почти пятьдесят лет он исследовал расщепленный мозг людей, перенесших такие операции. Газзанига на протяжении всей своей карьеры довольно оригинальным способом изучал, как именно левое и правое полушария взаимодействуют друг с другом. Он использовал визуальные сигналы, подаваемые пациентам.

Эксперименты с расщепленным мозгом очень логичны по замыслу. Если говорить об органах зрения, то информация, полученная левым глазом¹, обрабатывается правым полушарием. По аналогии правый глаз полученную им информацию отправляет на обработку в левое полушарие. Теперь нам нужно вспомнить, что в ходе эволюции функции мозга разделились на левополушарные и правополушарные. Если правый глаз не видит, то человек с расщепленным мозгом скажет, что он ничего не видит, даже если левым глазом он лицезреет «Банки с супом Кэмпбелл» Энди Уорхола². Однако, что интересно, если такого человека попросить нарисовать то, что он видит, он попытается воспроизвести изображение банок с супом. Это все потому, что правый глаз переносит то, чего мы якобы не видим, в левую часть мозга, которая затем пытается выразить то, что видел глаз, — то есть ничего. Но левый глаз переносит изображение «Банок с супом Кэмпбелл» в правое полушарие, которое механически воспроизводит рисунок. При этом, если «Банки с супом» Уорхола продемонстрированы правому глазу, пациент с расщепленным мозгом ответит что-нибудь вроде: «Я вижу Уорхола». Придумав систему, где пациенты с расщепленным мозгом видят разные изображения и предметы разными глазами, а затем отвечают на вопросы о том, что именно они видят, исследователи обнаружили удивительные тонкости того, как наш мозг справляется с визуальным мусором.

Один из наиболее известных экспериментов для изучения расщепленного мозга представляет собой мелькание картинок перед глазами пациента: для левого глаза показывается листок со словом «лицо», а для правого — со словом «улыбка»³ (рис. 12.2).

¹ Точнее, правое полушарие зрения обоих глаз — правым полушарием, а левое полушарие обоих глаз — левым. — *Прим. науч. ред.*

² «Банки с супом Кэмпбелл» — одна из самых известных работ американского художника Энди Уорхола (1928–1987), созданная им в 1962 году. Картина состоит из тридцати двух полотен, 51 см высотой и 41 см шириной, на каждом из которых изображена банка супа компании Campbell Soup.

³ Левым и правым полушариями зрения соответственно (рис. 12.2). — *Прим. науч. ред.*

Затем пациента с расщепленным мозгом просят нарисовать, что он видел, а потом объяснить, что он нарисовал. Одного из участников попросили нарисовать правой рукой (которая контролируется левым полушарием) то, что он увидел. Пациент нарисовал улыбающееся лицо. Вроде бы все правильно. Но затем его попросили объяснить, почему он нарисовал улыбающееся лицо. Тогда пациент, который не мог озвучить оба увиденных слова, выдал довольно разумный комментарий. Он сказал, что рисовал просто лицо, но ведь лицо с улыбкой куда приятнее, чем хмурое, и напоследок спросил: «Кто захочет унылое лицо?» Все это странно, но вполне объяснимо динамикой взаимодействия правого и левого полушарий. Левое полушарие, имея ограниченную информацию, составляет логически приятную картину, чтобы компенсировать не только недостаток информации, но и острую необходимость нарисовать лицо с улыбкой, поскольку все же где-то маячит призрак увиденного правым глазом слова «улыбка». Психологи называют это феноменом оправдания и объединения того, что пациент с расщепленным мозгом видит обоими глазами, «объединяя самосознание и ментальную жизнь».

Интересный эксперимент с пациентами с расщепленным мозгом провел Газзанига с коллегами: человек должен был узнать самого себя. Ученый задался фундаментальным вопросом: «Разрыв мозолистого тела у людей заставил нас задуматься о природе восприятия себя: имеет ли каждое полушарие мозга собственное представление о том, кто мы есть?» Ответ на этот вопрос требует базового понимания того, как мы воспринимаем внешний мир. Дэвид Терк применил компьютерные технологии и создал эксперимент под названием «Я или Майк?». Лицо пациента с расщепленным мозгом (JW) было преобразовано с помощью техники морфинга в лицо одного его давнишнего коллеги, которым случайно оказался Газзанига (MG). Для преобразования было сделано десять постепенно меняющихся изображений. Другими словами, спектр изображений лиц, идущий слева направо, начинался лицом JW на левом конце и заканчивался лицом MG справа. Восемь лиц между ними выглядели следующим образом:

на 90% как JW и на 10% как MG, затем на 80% как JW и на 20% как MG и т. д. В общем, если бы JW не был человеком с раздвоенным мозгом, то он воспринимал бы фотографии как 100%-ное свое изображение, 90%-ное, 80%-ное и т. д.

Затем Терк и его коллеги применили классический подход для экспонирования трансформированных изображений в левое полушарие (через правый глаз) и в правое полушарие (через левый глаз). При каждой экспозиции JW отвечал на вопрос: «Это я или это Майк?» Оказалось, что левое полушарие быстро и как бы линейно обнаруживает частичные образы себя, а правое полушарие при этом может распознать себя только по почти полной картинке. Точнее, для того чтобы трансформированное лицо было распознано как «я сам», в нем должно быть не менее 80% «себя». Поскольку левое или доминирующее полушарие распознает свое изображение даже с очень небольшим количеством «себя», это говорит о его более значительной роли в том, что Газзанига называет «самоузнаванием». Но эксперименты не подразумевают, что у каждой половины мозга есть индивидуальное чувство восприятия себя; скорее они показывают, что самоузнавание происходит от специализированных функций обоих полушарий вместе.

Безусловно, самый странный случай работы человеческого мозга с визуальной информацией и превращения ее в восприятие описан в исследовании Вилейанура Рамачандрана и его коллег. Рамачандран наиболее известен благодаря своему труду по синестезии и фантомным конечностям. В этой работе он использует синдром Капгра в качестве примера того, насколько мало может мозг, когда нужно объяснить необъяснимые ощущения, а также насколько это важная часть восприятия. Люди с синдромом Капгра утверждают, что близкие люди — самозванцы. В изученном Рамачандраном случае мужчина утверждал, что его мать — самозванка. Увидев ее во время эксперимента, он сказал что-то вроде: «Она похожа на мою маму, но это не она». Ученые замерили его эмоциональный отклик на ту встречу, и анализ показал, что реакция у него была нейтральной. Подобное равнодушие ребенка —

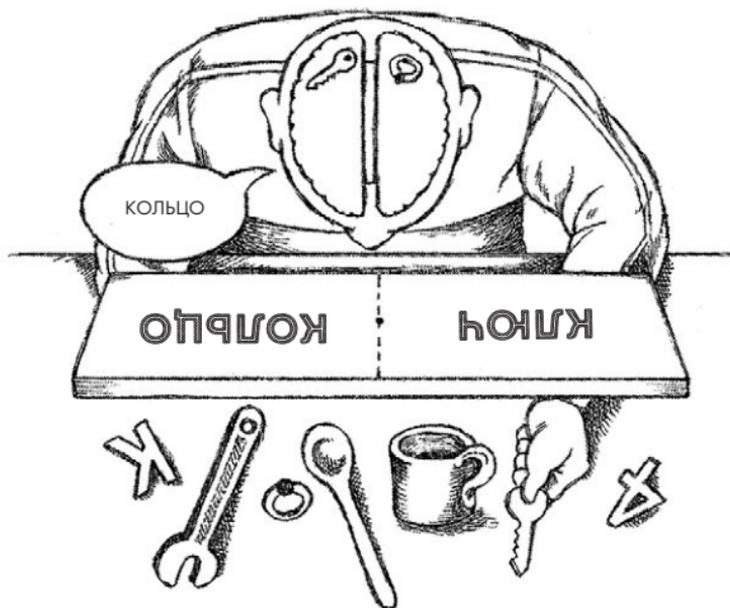


Рис. 12.2. Проведение эксперимента с расщепленным мозгом

истинный кошмар каждой матери, хотя более чем вероятно, что сына терзает сильное чувство вины.

Рамачандран предлагает следующее объяснение этого странного поведения. Исследованный им человек ранее получил травму головы, и его лимбическая система (в частности, миндалина — область, находящаяся глубоко внутри мозга и отвечающая за эмоции) была повреждена. Кроме того, с большой вероятностью изменились и связи височной коры с лимбической системой. Другая важная деталь заключается в том, что та область височной доли (она называется веретенообразной извилиной), которая отвечает за обработку изображений лица и за распознавание лиц, так же связана с лимбической системой, как и многие другие области мозга. Таким образом, индивид видит свою мать, узнает ее как таковую, пытается отправить эту информацию в миндалевидное тело для эмоциональной обработки, но информация блокируется, и поэтому остается единственное возможное логическое объяснение: это не моя мать, потому что мне не хватает эмоций для нее. Его мозг, пытаясь разобраться во всей этой путанице мыслей и зрительных образов, придумывает историю о самозван-

ке. Если же мать звонит ему по телефону и говорит с ним, он узнает ее голос и правильно посылает эту информацию в миндалевидное тело, то есть получает эмоциональную реакцию. И никаких самозванцев.

Когда технология визуализации начала стремительно развиваться, Майкл Газзанига сказал: «Я не сомневаюсь, что взаимодействие между исследованиями расщепленного мозга и другими методологиями, такими как нейровизуализация, будет и впредь проливать свет на человеческий разум и мозг». Тем не менее те исследования расщепленного мозга, результаты которых я использовал, чтобы рассказать о том, как мозг обрабатывает сенсорную информацию, остались в прошлом. Хирурги пришли к выводу, что подобные операции оказались не настолько эффективными, как ожидалось, и прекратили их делать. Многие пациенты, перенесшие операцию по расщеплению мозга, теперь умирают от естественных причин, а вместе с ними исчезает и возможность изучать эти феномены. Гемисферэктомию продолжают делать очень маленьким детям, но, поскольку мозг сильно переживает по мере их взросления и развития, эффекты расщепления мозга становятся менее выраженными и этих людей уже нельзя использовать для исследований. Несчастные случаи будут происходить и дальше, и если повреждение затронет какие-то специфические области мозга, то это приведет к явлениям, характерным для расщепленного мозга. Исследователи уже давно предполагают, что люди с редким врожденным расстройством, называемым агенезией мозолистого тела (AgCC), могут быть спасителями парадигмы расщепленного мозга. Лишь в последнее время такие случаи приобрели важное значение из-за сокращения популяции пациентов с хирургически расщепленным мозгом. Несчастные люди с AgCC рождаются с полным или частичным отсутствием мозолистого тела. Без мозолистого тела нервные волокна, которые составляют эту структуру, вместо того чтобы развиваться в широтном направлении (и соединять полушария мозга), развиваются в продольном направлении внутри полушарий. Частичные нарушения мозолистого тела носят раз-

ные названия, но эффект дают тот же, что и при операциях, вызывающих явления расщепления мозга.

Существует некоторое явное сходство людей, перенесших операцию по расщеплению мозга, и людей с AgCC. Несмотря на то что у вторых присутствуют ограниченные связи между полушариями мозга, они, судя по всему, в большей степени задействуют оба полушария, чем те, кто перенес операцию. Возраст, в котором проводят исследование пациента с агенезией мозолистого тела, также служит фактором связности двух полушарий и показывает, что нейронная пластичность может в некоторых случаях компенсировать отсутствие связи, поскольку дети с AgCC становятся подростками и взрослыми. Люди с AgCC и те, кто перенес операцию, схожи в том, что испытывают серьезные затруднения в сложных ситуациях. К сожалению, у пациентов с AgCC часто проявляются многие признаки расстройства аутистического спектра. Один из наиболее известных и заметных случаев AgCC описан в фильме 1988 года «Человек дождя», где Дастин Хоффман играет взрослого аутиста. Человек, послуживший прототипом главного героя, — Лоуренс Ким Пик (умер в 2009 году) — считался мегатегением благодаря своей способности запоминать разные вещи. Хоффман сыграл Пика как удивительного и сложного человека с проявлениями аутизма, попавшего в мир за пределами учреждения, где он до этого долго жил.

В 2013 году Пратик Мукерджи и его коллеги обследовали нескольких человек с AgCC и определили, что при врожденной аномалии поражено не только мозолистое тело, но и поясная извилина. Хорошо известно, что эта область мозга имеет решающее значение для обработки информации с точки зрения эмоционального контекста. Без нормальной связи с этой областью мозга эмоциональная реакция на сенсорную информацию теряется из-за отсутствия соединений. Это исследование объяснило многие поведенческие признаки Пика и других людей с подобным синдромом развития. Каким образом исследования людей с AgCC будут включены в исследование расщепленного мозга — это другая ис-

тория, но люди с этим диагнозом и их необычное строение мозга, вызванное проблемами развития, могут стать важным звеном к пониманию нюансов того, как мозг обрабатывает сложную сенсорную информацию, которая приводит к эмоциональным, логическим и перцептивным реакциям на внешний мир.

Одна из зацепок на этом тернистом пути — то, как пациенты с AgCC воспринимают и интерпретируют пословицы. Пословицы — это небольшие утверждения, состоящие, как правило, из одного предложения, которые не нужно интерпретировать буквально для понимания смысла. Например: «Не судите о книге по обложке». Оказывается, пациенты с агнезией мозолистого тела довольно плохо справляются с тестами, включающими пословицы, по сравнению со сверстниками с неповрежденным мозолистым телом. Это означает, что есть некоторые ключевые различия в том, как люди с AgCC обрабатывают сложные сенсорные данные.

В целом человеческий мозг удивительно ловко справляется с сигналами из внешнего мира. Люди разработали интересные, хитроумные и уникальные, а иногда и противоречащие логике нейронные механизмы для взаимодействия со сферой чувств. И особенно интересно, когда ощущения человека взаимодействуют в кроссmodalных формах. Ведь лишь немногие из наших сенсорных переживаний связаны с каким-то одним чувством.

«КОМАНДА СОПЕРНИКОВ» ПРОТИВ «ЕГО НЕСОВЕРШЕНСТВА»

Разбираемся в кроссмодальных стимулах
внешнего мира

И слепой говорит глухому: «Ты видишь то, что я слышу?»

Уэйн Тротман, кинорежиссер

Существует множество броских названий для мозга и того, что он делает. У меня есть два любимых: «его несовершенство» и «команда соперников». Конечно, на ум приходят и другие (здесь я стесняюсь их назвать), но мне нравятся именно эти два, потому что они охватывают эволюционный, психологический и неврологический контекст нашего мозга. Словом «несовершенство» нейробиолог Гари Маркус описывает мозг в своей книге «Несовершенный человек». Маркус представляет мозг как своего рода машину Робинсона — Голдберга, используя немецкое слово *kluge*, которое означает «плохо подобранный набор деталей, собранных вместе для выполнения определенной задачи». Выражение «команда соперников» пришло из книги «Инкогнито» Дэвида Иглмена, тоже нейробиолога. Его способ изобразить мозг обыгрывает известную стратегию Авраама Линкольна, примененную на собрании кабинета министров во время Гражданской войны (и которую прославила историк Дорис Гудвин).

Устройство мозга довольно беспорядочно и во многом не поддается архитектурной или инженерной логике. Некоторые сравнивают его с компьютером, но эта аналогия скорее неверна: компьютеры развиваются не так, как мозг. Компьютеры

действительно изменились с течением времени, и можно утверждать, что они эволюционировали, но история эволюции мозга куда более неоднозначна. В эволюции нет ни дублей, ни вторых шансов, поэтому структуры, которые мы наблюдаем у организмов, и особенно в мозге, являются результатом происхождения от общего предка. Следовательно, мозг формируется под влиянием исторической случайности эволюционного процесса. Но лучшие и самые инновационные решения в вычислительной технике те, что отбрасывают большую часть предыдущих достижений и начинают с относительно чистого листа: своего рода вторая попытка.

Человеческий мозг довольно плохой пример хорошей инженерии, но он работает. Как только структура или модель поведения возникает как продукт мутации и устанавливается в результате естественного отбора, она сохраняется в популяции. То же самое происходит и при дрейфе генов, причем независимо от совершенства структурных и поведенческих черт. И, если естественный отбор действует дальше и преумножает это несовершенство, популяция не может просто отказаться от этого решения и выбрать более совершенный подход. Напротив, естественный отбор вынужден использовать существующую вариацию, и если та является несовершенной, то велика вероятность, что продукт естественного отбора будет еще более несовершенным. Были случаи, когда фенотип особей в популяции быстро и существенно изменялся (путем дрейфа генов или других эволюционных процессов, так называемых «обнадеживающих монстров») для того, чтобы получить продукт естественного отбора, довольно сильно отличающийся от исходного варианта. Но по большей части существующие варианты являются тем, с чем работает естественный отбор. Это не значит, что несовершенные вещи становятся лишь более несовершенными. Это означает только то, что несовершенство порождает другие несовершенства, и, скорее всего, именно это произошло с мозгом, как показано на примере изменений по всему древу жизни и особенно в той его части, где представлены позвоночные.

Аналогия Иглмена с «командой соперников», кроме прочего, отлично описывает неврологические особенности мозга и то, как мы чувствуем окружающий мир. По словам историка Дорис Гудвин, стратегия Авраама Линкольна в формировании кабинета министров в 1860-е годы заключалась в том, чтобы набрать людей, которые наверняка будут конфликтовать и с ним, и друг с другом, создавая таким образом нечто большее, чем просто спор ради спора. Эти непримиримые соперники хорошо работали вместе, несмотря на разногласия по вопросу рабства, полярные политические взгляды, угрозу раскола страны и разрушающее действие Гражданской войны. Мозг с помощью органов чувств вбирает в себя из окружающего мира всю противоречивую информацию, задействует химические раздражители нервной и гормональной системы, использует психологию и другие поступающие извне данные и как-то их интерпретирует для того, чтобы поддерживать функционирование организма. Конфликтные ситуации и соперничество — важные аспекты работы мозга. Если не будет конфликтов, а следовательно, и проблем, то работа будет завершена без сбоев и огрехов. В качестве примера Иглмен говорит о машине, которая поворачивает за угол: это не конфликтная ситуация, соответственно нет никакой проблемы. Руль и водитель, поворачивающий его, контролируют автомобиль. Автомобиль не жалуется на то, что ему приходится поворачивать, — опять же, никаких конфликтов. Мозг работает иначе. То, как мы воспринимаем раздражители из окружающего мира, можно рассмотреть и проанализировать в двух направлениях: снизу вверх и сверху вниз.

Мозг постоянно решает конфликты противоречащих друг другу информационных сигналов. Проблема в том, чтобы расшифровать, как мы обрабатываем поступающие данные. Психологи считают, что мы можем сделать это двумя основными способами. Если информация имеет оптическую природу, то в мозг она поступает окольными путями, чтобы определить тени, цвет, форму и другие аспекты всего, что мы видим. Память и эмоции тоже вступают в игру и дают общее представление того, что видели наши глаза. Поскольку этот способ восприятия начинается с дан-

ных или информации, а информация основана на других нейронных функциях со все возрастающей сложностью, психологи называют это восходящим подходом к восприятию. Другой подход к восприятию начинается с сенсорной информации, вызывающей воспоминания и эмоции о вещах, которые мы видели и с которыми взаимодействовали в прошлом. В мозге существует база данных, реагирующая на первоначальные стимулы, и, используя эту эмпирическую справку, наши чувства отслеживают информацию через другие части мозга, чтобы построить восприятие. Этот маршрут в значительной степени противоположен восходящему подходу и называется нисходящим. Последняя сортировка информации (сверху вниз) для создания восприятия запускается в контексте памяти, эмоций и других функций мозга высшего порядка.

Важность нейронных связей в том, как именно мы используем информацию, получаемую органами чувств, и как интегрируем данные из разных источников для формирования восприятия окружающего мира, — это и есть вопрос интеграции. Но все же сверху вниз или снизу вверх? На самом деле во многих отношениях это совершенно не важно, — вполне вероятно, что мозг при восприятии совмещает эти два подхода. Понимание того, что оба процесса возможны, позволяет психологам выдвигать проверяемые гипотезы о работе восприятия и создавать уникальные эксперименты для их тестирования. И хотя этот подход нацелен на то, чтобы отвергать гипотезы, в этой экспериментальной структуре мы часто не можем ничего отклонить в контексте реальности. Результатами экспериментов такого рода становится как лучшее понимание процесса мозговой обработки информации, так и более точные гипотезы восприятия.

Нейронные пути в мозге, которые принимают от органов чувств информацию из внешнего мира и проводят ее через мозг, часто идут не напрямую. У каждого из шести основных чувств свой маршрут, что указывает на то, что за обработку различной сенсорной информации отвечают разные части мозга. Мы уже видели, как сенсорная кора участвует в обработке прикоснове-

ний, и, хотя с помощью гомункулов мы можем сопоставить пути с точками их обработки, есть и другие части мозга, где сигналы от осязания должны взаимодействовать с памятью и другими высшими функциями. Возможно, наиболее понятным из запутанных путей, участвующих в интерпретации ощущений, обладает зрение (рис. 13.1). За годы нейроанатомической и психологической работы ученые довольно точно определили основные пути прохождения зрительной информации.

Зрительное восприятие начинается с глаза: при попадании света на колбочки и палочки сетчатки там формируются нейронные импульсы. Путь, по которому импульсы идут от сетчатки к мозгу, можно расшифровать простым отслеживанием анатомических структур, исходящих от глаза. Отростки нервных клеток, идущие от глаза, сгруппированы в довольно крупные нервные структуры, называемые зрительными нервами. Эти нервы пересекаются: зрительный нерв от левого глаза идет в правую часть мозга, а от правого глаза — в левую через хиазму¹. Сразу же после оптической хиазмы два нервных пучка уходят дальше в мозг и соединяются со структурами, называемыми латеральными коленчатыми телами — по одному с каждой стороны мозга. Затем оба латеральных коленчатых тела служат как бы ретрансляционными станциями, которые посылают импульсы дальше в определенные области в задней части мозга, откуда лучами отходят клетки зрительного нерва. Открытие функций лучистостей или потоков нейронов подробно обсуждается ниже. Обработка информации не завершается на этих лучистостях или потоках: далее они тянутся к зрительной коре и там² делают петлю до префронтальной коры, где данные помещаются в рабочую память, чтобы мы легко могли получить доступ к информации для дальнейшего использования. То, что происходит в каждой из этих областей мозга, было предметом многочислен-

¹ Правильнее говорить о левом и правом полуполях зрения, так как перекрест зрительных нервов у человека неполный. — *Прим. науч. ред.*

² Уже от нейронов зрительной коры. — *Прим. науч. ред.*

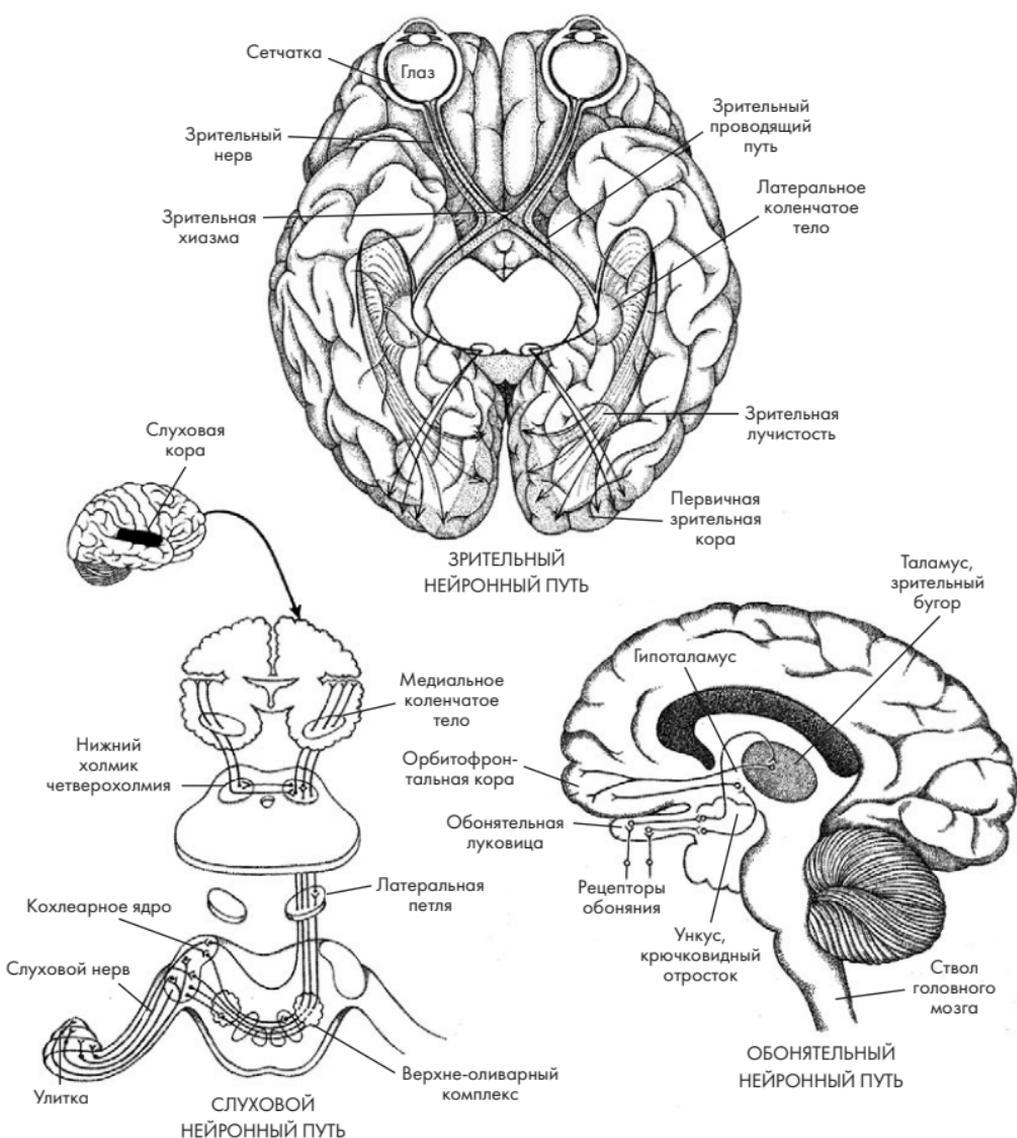


Рис. 13.1. Нейронные пути для зрения (сверху), слуха (внизу слева) и обоняния (внизу справа)

ных исследований, которые показали, насколько сложен мозг на самом деле.

Сто лет назад несколько немецких специалистов по нейроанатомии при помощи метода клинко-анатомической корреляции установили, что при повреждении определенной области мозга развивается визуальная аномалия, называемая агнозией. Их на-

блюдения позволили прийти к выводу, что люди с серьезными травмами двух областей мозга — нижней области височной доли и передней части затылочной коры — не могут идентифицировать предмет, расположенный перед ними. Если говорить конкретнее, две извилины (выпуклые складки человеческого мозга) — языковая и веретенообразная — чаще всего подвергались поражению, вызывающему зрительную агнозию. Поскольку глаз сам по себе не является источником зрительной агнозии, фактическая зрительная информация из внешнего мира все же поступает в мозг. А вот повреждение этих специфических областей мозга как раз препятствует обработке информации и приводит к агнозии. Два нейробиолога, Генрих Клювер и Пол Бьюси, в 30-е годы XX века провели несколько довольно жестоких экспериментов, в ходе которых они удаляли участки мозга макаки-резуса (*Macaca mulatta*), чтобы определить, как отсутствие той или иной области влияет на функциональность. По результатам этих ныне известных экспериментов (в которых есть что-то от опытов Ганнибала Лектера) был открыт синдром, названный именами ученых: синдром Клювера — Бьюси. Удаление большей части мозга из одного полушария часто может быть скомпенсировано путем повторного образования нейронных связей, но Клювер и Бьюси сделали то, что называется двусторонним иссечением, то есть они удалили соответствующие части с обеих сторон мозга. В итоге у обезьян очень испортилось зрение, что негативно сказалось и на их поведенческих аспектах: они были не способны правильно или даже частично распознавать изображения, и это сильно повлияло на их модель поведения, особенно в питании и сексе.

Какими бы жестокими ни были эти эксперименты (и, вероятно, сегодня защитники прав животных осудили бы их), они помогли определить нейронные пути, участвующие в передаче зрительной информации. И можно с уверенностью сказать: без этих исследований с удалением областей мозга у макак нам пришлось бы полагаться на причуды клинико-анатомического метода корреляции, и, скорее всего, мы имели бы только очень частичную картину нейронных путей, участвующих в зрительном восприя-

13.1 | «ЧТО» И «ГДЕ»

Исследования с иссечением областей мозга, которые проводили Генрих Клювер и Пол Бьюси, показали, что нарушение вентрального потока (или в терминологии анатомии мозга макаки — затылочно-височного потока) путем удаления кусков нижней височной доли приводит к тому, что обезьяны теряют способность различать предметы. По сути, эти обезьяны, вероятно, стали принимать сородичей за бананы. У них были проблемы с определением того, «что» они видели, при этом они сохраняли пространственную остроту зрения и легко воспринимали перспективу и расстояние до предметов («где»). Обезьяны с иссечениями в дорсальном пути (в терминах анатомии обезьян — затылочно-височного потока) могли идентифицировать предметы, но имели трудности с пространственным зрением, или определением «где». Эти результаты дали представление о дихотомии, или разделении функций «что» и «где» вентрального и дорсального потоков зрительной информации.

тии. Наиболее важная работа из этих исследований с иссечением областей мозга выявила два пути, через которые обрабатываются потенциалы действия, необходимые для зрительного восприятия. Оказывается, есть верхний (дорсальный) путь и нижний (вентральный) поток нейронов, которые обрабатывают зрительную информацию. Вентральный поток отвечает за то, «что» мы воспринимаем, а дорсальный — за то, «где» происходит восприятие (см. вставку 13.1).

Внутри каждого потока нейронные импульсы проходят по строго определенным путям, и, следовательно, каждая часть мозга в этих потоках выполняет четко определенные задачи (рис. 13.2). Например, как мозг обрабатывает цвет? Цвет относится к области «что» и обрабатывается в вентральном потоке, поэтому и часть мозга, обрабатывающая цвет, находится в вентральном потоке в височной доле. Кроме цвета, эта часть мозга также обрабатывает формы, оттенки и текстуры, только каждый

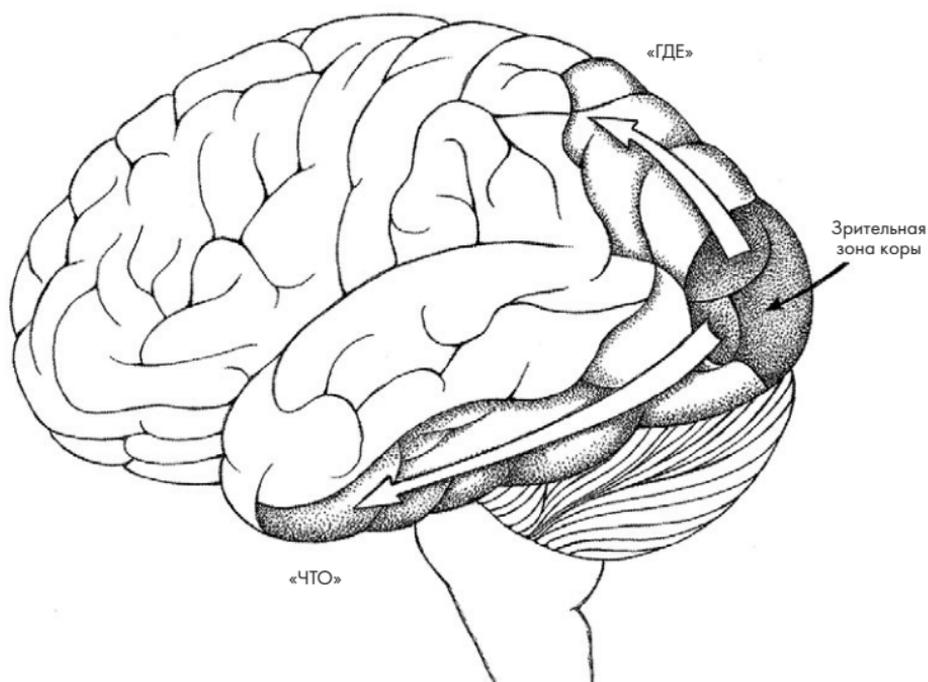


Рис. 13.2. Зрительные нейронные пути «что» и «где» в зрительной коре головного мозга человека

из этих аспектов «что» обрабатывается в своей подзоне вентрального потока, и эти подзоны называются V-областями. Эти вентральные функции обработки информации различны и относятся к очень специфическим зонам мозга. Считается, что они последовательно соединены. На самом деле V-области нумеруются, и нумерация отражает их место в пространственной иерархии каждого из двух потоков.

А как насчет того, что движется? Здесь мы хотим знать, «где» движущийся объект располагается в пространстве. То есть это информация о том, «где» предмет, а, как мы уже говорили ранее, «где» обрабатывается в зрительном пути дорсального потока. Действительно, такие вещи, как движение, направление и скорость объектов, обрабатываются в спинном потоке и снова в уникальных V-областях мозга. Маршрут, по которому движутся потенциалы действия, может быть прямым или обходным в зависимости от сложности определения «что» или «где» объекта. Другими слова-

ми, хотя исследователи поняли пространственное расположение важных для обработки зрительных стимулов V-областей и других областей височных и теменных долей, маршрут, по которому проходят нервные импульсы, не только нелинейный, но и ненаправленный. Нейроны в различных областях мозга, где обрабатывается информация, имеют разнонаправленную функцию. Это означает, что зрение не обязательно однонаправленно и идет от нейронов, передающих менее сложные восприятия, к нейронам, отвечающим за более сложные восприятия. Система лучше всего описывается как имеющая и мощную обратную связь, и функционал прямой связи. Кроме того, некоторые связи пропускают иерархические уровни в вентральном и дорсальном потоках. И, чтобы еще больше усложнить ситуацию, существуют потенциальные связи внутри отдельных V-областей зрительных путей, которые имеют решающее значение для обработки зрительных раздражителей.

Как же эта нейронная архитектура взаимодействует с нисходящей и восходящей обработкой зрительных стимулов? Это означает, что возможны оба типа обработки. Все, что имеет прямой нейронный путь, будет частью восходящего процесса, а все, что может идти обратно, будет частью нисходящего процесса. Нетрудно визуализировать нейронные реакции на зрительные раздражители, которые понемногу связаны как с обратной связью, так и с прямыми паттернами. И это делает обработку зрительной информации частично процессом, идущим сверху вниз, а частично — снизу вверх.

Нейронные пути для чувств «большой пятерки» довольно хорошо изучены, так же как и общая организация того маршрута, по которому исходные потенциалы действия от внешних органов чувств следуют к вышележащим уровням согласно иерархическому принципу архитектуры сенсорных путей, про который я говорю: «Все очень сложно». Обонятельные и вкусовые рецепторы активируются химическим путем. Производимые хеморецепцией в носу потенциалы действия перемещаются на относительно небольшое расстояние, потому что первая остановка для импульсов — обонятельные луковицы — расположена почти

непосредственно над обонятельными рецепторами. Импульсы идут к мозгу по довольно прямому маршруту, который пролегает через обонятельные луковицы, где и осуществляется первичная обработка. Далее импульсы следуют к первичной обонятельной коре (рис. 13.1). Затем эта кора передает нервные импульсы в две области: в гипоталамус и таламус так называемой лимбической системы, расположенной внутри мозга, а также в орбитофронтальную кору, расположенную в лобных долях. Последняя область отвечает за принятие решений. Все эти связи, вероятнее всего, эволюционировали как средство быстрого принятия решений организмами на основе обоняния.

Вкусовые рецепторы в сосочках языка взаимодействуют с химическими веществами пищи или напитка, попавшими нам в рот. Возникший вследствие этого взаимодействия потенциал действия по черепным нервам поступает в мозг. И хотя эти пути не ведут напрямую в определенные области мозга (как это происходит в случае обоняния), тем не менее они достигают тех же областей мозга, что и обонятельные импульсы. Нервные импульсы, генерируемые вкусовыми рецепторами на передних двух третях языка, принимают три главных черепных нерва. Один черепной нерв передает информацию от горла, верхней части рта и задней трети языка. Эти импульсы идут вглубь трех областей лимбической системы, к которой относится и таламус. Оттуда импульсы передаются обратно во вкусовую область коры, где источник импульсов интерпретируется как сладкий, кислый, соленый, горький, умами или как некая комбинация этих вкусов. Вкусовая область расположена в орбитофронтальной коре, где обрабатывается и обоняние. Этот путь частично объясняет, почему вкус и запах так тесно связаны. То, что мы называем вкусом, на самом деле представляет собой мультисенсорный опыт, связанный с запахом, вкусом и текстурой. Многие исследователи утверждают, что эта тесная интеграция трех сенсорных путей — результат экстремального естественного отбора, нацеленного на то, чтобы организмы могли быстро и четко принимать решения относительно того, что попало к ним в рот. Конечно, поскольку чувства интерпретируются мозгом, эта информация

тесно взаимодействует с физиологией организма применительно к системе вознаграждений. В результате эволюции рот у организмов стал довольно сложным органом чувств.

Слуховое восприятие начинается со сложных структур во внутреннем ухе, которые создают потенциал действия в результате воздействия звуковых волн на их замысловатое устройство (см. главу 5). Остальная часть системы так же затейлива, как и зрительное восприятие (рис. 13.1). Невозможно дать полное описание в одном абзаце, поэтому я немного упрощу его. После того как импульсы создают ответную реакцию на звуковые волны, они перемещаются к группе нервных клеток, называемых кортиевым органом. Здесь также участвует один из черепных нервов, который связывает внутреннее ухо со стволом головного мозга, где осуществляется связь с группой нервных клеток, называемых кохлеарными ядрами. Кроме того, существуют связи с таламусом в лимбической системе. Есть и еще одна специфическая связь: она идет к первичной слуховой коре головного мозга в так называемую верхнюю височную извилину (один из выпуклых валиков мозга в височной доле). Импульсы передаются в разные области мозга для обработки более высокого порядка, например для понимания языка и реагирования на язык, как в случае с областями Брока и Вернике.

Связанная с основными движениями организма вестибулярная система отвечает за поддержание его равновесия и использует для этого огромное количество мышц. Поэтому пути обработки сигналов этого чувства тоже очень сложно устроены. В итоге равновесие контролирует мозжечок, поэтому аксоны этих путей прокладывают свою дорогу к этой структуре, расположенной в основании мозга. Для работы этой системы задействованы и восходящие пути (передача информации осуществляется по спинному мозгу в мозжечок), и нисходящие (от ствола головного мозга обратно по спинному мозгу). Процесс начинается, когда один из главных черепных нервов несет начальный потенциал действия от внутреннего уха к основанию мозга. Оказавшись там, импульсы идут к различным пучкам или ядрам нервных клеток в продолговатом мозге и варолиевом мосту ствола головного мозга и в мозжечке. Различные пуч-

ки нервных клеток отвечают за разные аспекты равновесия. Ядра варолиевого моста и продолговатого мозга соединяются с нисходящими путями. Один путь, пролегающий сбоку, соединяется со спинным мозгом и проходит по всей его длине. Сбалансированная ходьба в вертикальном положении — это результат правильного прохода сигналов по этому пути. Другой путь — медиальный, он использует спинной мозг для перемещения к срединно-грудным областям спинного мозга и вместе с ним контролирует и уравнивает движения глаз и головы.

Пять или более видов сенсорных рецепторов на коже (см. главу 8) стимулируются механически и производят потенциалы действия, идущие в мозг. Эти импульсы в конечном счете проходят через мозг к сенсорной коре, где сенсорные импульсы интерпретируются и реализуются. Есть три встроенных в кожу основных пути к мозгу от органов чувств, разделяющихся по той информации, которую они переносят. Осознание и ощущение того, где находится наш организм в трехмерном пространстве, перемещаются к мозгу с помощью нейронов, проходящих вдоль задней (дорсальной) стороны нашего тела. Основные аспекты проприоцептивных стимулов, с которыми справляется чувство равновесия, также идут в головной мозг через спинной. Существует и третий путь к мозгу, по нему проходят импульсы, необходимые для восприятия температуры и боли. Как только импульсы попадают в мозг, они собираются в первичной соматосенсорной коре — той области мозга, которую мы подробно обсуждали на примере гомункулов в главе 3. Большая часть остальной истории чувств — это то, что называется мультисенсорной интеграцией или кроссмодальными взаимодействиями. Эти взаимодействия важны для быстрой, точной, а иногда и необходимой для выживания интерпретации сенсорной информации.

Запах, который вы уловили, вспышка света в ваших глазах, прикосновение легкого ветерка к вашей коже — все это сложные восприятия, которые обрабатываются вашим мозгом. Ничто из этого — ни обоняние, ни зрение, ни осознание — на самом деле не одно чувство, это всегда результат взаимодействия чувств.

Рассмотрим в этом контексте прикосновения. Информация, собранная нашими сенсорными нервными клетками, передается потенциалом действия от различных видов клеток кожи, воспринимающих прикосновение. Затем полученный потенциал действия интегрируется различными частями мозга. В этот процесс плотно вовлечена сенсорная кора, как показали опросы, которые проводил Уайлдер Пенфилд, исследовавший пациентов во время операций на головном мозге. Здесь происходит нечто большее, чем просто обработка прикосновения сенсорной корой. Наш мозг мог бы легко остановиться на обработке сенсорной информации, не усложняя дела, но в мире естественного отбора и генетического дрейфа происходят более сложные вещи. Для достижения максимальной детализации тактильного раздражения (что важно в адаптивном контексте для выживания вида) наш мозг включает больше информации о прикосновении. По поводу осязания хорошо известно, что с его помощью мозговая активность усиливается не только в соматосенсорной коре, но и в других отделах мозга. Активация происходит в областях мозга, отвечающих в числе прочего за зрение и слух. Причина в том, что сигнал, который наш мозг пытается воспринять с первого прикосновения, может быть нечистым. Под нечистым я подразумеваю, что стимул может не иметь нужного уровня информации для мозга, чтобы тот пришел к разумному выводу об акте тактильного раздражения. Первоначальное прикосновение может быть жестким столкновением кожи с объектом, и в этом случае информация, поступающая в мозг, настолько хаотична, что переполняет мозг и вызывает проблемы с ее интерпретацией. Но более вероятно, что первоначальное прикосновение будет настолько легким, что возникнет необходимость в других органах чувств для усиления поступающей в мозг информации. Кроссmodalность действительно наиболее важна в ситуациях, когда исходное ощущение выражено очень слабо, подавлено или нарушено. Ведь мозг все еще должен каким-то образом интерпретировать сигнал. Хорошей отправной точкой будет возвращение к разговору о нейронном соперничестве, ведь оно существует почти для всех органов чувств.

НЕЙРОННЫЙ МУСОР

Разбираемся с шумом окружающей среды

В мире шум и беспорядок. И нужно уживаться с этим гвалтом и неопределенностью.

ДАФНА КОЛЛЕР, профессор информатики

Более пятидесяти лет назад, когда только начинали исследовать расщепленный мозг, голландский психолог Виллем Левелт опубликовал длинную работу «О бинокулярном соревновании»¹, посвященную феномену, известному еще с XIX века. Бинокулярное соревнование происходит, когда человек правым и левым глазом видит разные изображения или когда его глаза по-разному воспринимают зрительную информацию. Человек, наблюдая за изображениями, может одновременно воспринимать только одно из них, и мозг в процессе восприятия переключается между двумя картинками, поступающими от двух глаз. С этим явлением связаны оптические иллюзии, хотя это все-таки не одно и то же (см. вставку 14.1).

Подобное соперничество характерно и для других чувств. Несколько десятилетий назад ученые сообщили о новой слуховой иллюзии, которая, по их мнению, была как раз результатом слухового соперничества. В экспериментах, в ходе которых она была обнаружена, принимали участие правши и левши. Выбор участников не случаен, потому что преобладающая рука, види-

¹ В русскоязычной литературе данный феномен известен как борьба полей зрения. — *Прим. науч. ред.*

мо, указывает на то, какое полушарие головного мозга доминирует, а чтобы понять, как именно человек интерпретирует слуховые иллюзии, важно знать доминирующую сторону его мозга. Здесь необходимо кратко пояснить, что такое преобладающая рука. И, поскольку это во многом зависит от генов, обратимся к генетике. Некоторые черты человека, например дальтонизм, контролируются одним геном и являются слабым признаком. Другие же, такие как рост или вес, закреплены жестче, потому что контролируются несколькими генами. На протяжении многих лет разные гены считались ответственными за проявление праворукости или леворукости, но никакой конкретики выявлено не было. Современные исследования генома в целом, сделанные на примерах геномов тысяч людей, не смогли обнаружить такие гены, и даже проверенный метод работы с идентичными близнецами в данном случае не помог. Неспособность точно определить гены, отвечающие за преобладание той или иной руки, позволяет предположить, что здесь задействованы разные гены.

Из генетических исследований проявления праворукости или леворукости можно сделать два важных вывода, и оба они имеют отношение к односторонности мозга. Во-первых, поскольку этот признак генетически сложный и, вероятно, является результатом аддитивного эффекта нескольких генов, экспрессия признака может быть результатом накопления генов, чем объясняется смещение в сторону праворукости. Для тех, у кого этого смещения не происходит, станут ли они левшами, определяется случайным образом. Другими словами, нет так называемого гена левши. Во-вторых, возможно, существует более одного проявления генов, определяющих праворукость. Тем не менее если человек правша, то, скорее всего, у него доминирует левая сторона мозга, а если он левша, то правая.

Используя эту особенность, Диана Дойч взяла правшу и левшу, надела на них наушники и включила звуки разной высоты. Она чередовала очень короткие звуки (одна четверть секунды) разной частоты — 400 Гц и 800 Гц — без промежутков между ними.

14.1 | ОПТИЧЕСКИЕ ИЛЛЮЗИИ

Одним из классических примеров оптической иллюзии является изображение двух силуэтов белого цвета — мужские или женские профили, расположенные нос к носу (рис. 14.1; там же показана и другая аналогичная иллюзия). Пространство между лицами заполнено черным цветом и по контуру напоминает вазу. Все подобные иллюзии со всей очевидностью подтверждают, что человек никогда не воспринимает оба изображения одновременно. Скорее наше восприятие этих двух картинок сдвигается от одной к другой, когда мы заставляем мозг воспринимать либо одну из них, либо другую. Мы просто-напросто не можем видеть обе. Кстати, это явление было открыто параллельно с изобретением стереоскопа. Несмотря на то что о бинокулярном соревновании известно уже почти двести лет, мы до сих пор не знаем, что именно при этом происходит в мозге.

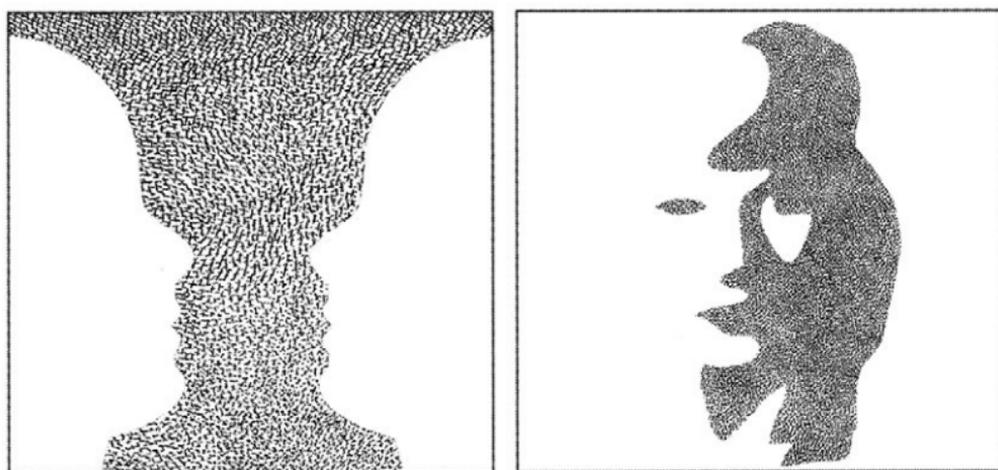


Рис. 14.1. Два классических примера черно-белой оптической иллюзии. Что вы видите слева: вазу или лица? А справа саксофониста или лицо девушки?

Амплитуда звука была одинаковой для обеих частот. Когда левое ухо слышало 400 Герц, в правое поступал звук с частотой 800 Герц. Эти два тона были выбраны потому, что более низкий тон (400 Гц) легче слышать, чем более высокий тон (800 Гц). При правильном восприятии высокий уровень звука слышен в одном ухе, а низ-

кий — в другом. И восприятие смещается туда-сюда от левого уха к правому. Человек должен слышать чередование «ууу» и «жжж», где первое «ууу» или «жжж» слышно в левом ухе, а второе — в правом. Между ушами должны проходить волновые колебания.

Удивительно, но большинство людей просто слышат один тон в одном ухе и второй тон в другом ухе, и эти тона чередуются. Таким образом, это звучит как «ууу» (правое ухо), «жжж» (левое ухо), «ууу» (правое ухо), «жжж» (левое) и т.д. Многие люди просто слышали «ууу» (правое ухо), «ууу» (левое ухо), «ууу» (правое ухо), «ууу» (левое ухо) и т.д. И лишь небольшой процент тестируемых слышал третий призрачный (несуществующий) тон, перемежающийся с двумя реальными тонами. Из восьмидесяти шести испытуемых ни один не воспринял правильную структуру тонов или их волнообразность. Но какое отношение это имеет к проявлению праворукости или леворукости? Выяснилось, что правши слышат более высокий звук правым ухом, а низкий — левым. Даже когда наушники, воспроизводящие звук, были перепутаны, они все равно слышали звуки таким образом. У левшей не было конкретной корреляции звуков, они слышали их более или менее случайным образом, просто одно ухо слышало более высокий тон, а другое — более низкий.

Таким образом, кажется, что во всех структурах нашего организма, имеющих два входа для сенсорной информации, или, другими словами, являющихся двусторонними, есть это соперничество. Двусторонняя симметрия возникла сотни миллионов лет назад, и большинство высших животных являются ее прекрасными примерами.

Какие еще органы чувств являются двусторонними? На ум приходят три: один очевидный, а два других — не особо. Под очевидным я подразумеваю обонятельный первичный орган чувств, или ноздри. А вот менее очевидны сенсорные органы, расположенные симметрично на левой и правой сторонах тела. И еще органы равновесия.

Соперничество обонятельных органов недавно было исследовано путем воздействия на одну ноздрю фенилэтиловым спиртом

(PEA), а на другую — н-бутанолом. Эти два химических вещества пахнут по-разному: PEA — это благоухающая смесь с оттенками розы и меда, а н-бутанол имеет резкий запах, немного напоминающий фломастер. Поскольку обонятельная система может очень быстро адаптироваться к запахам (примерно за двадцать секунд — такой способностью не обладают ни зрение, ни слух), обсуждаемые ранее эксперименты на разницу восприятия глазами и ушами были модифицированы, чтобы свести к минимуму влияние адаптации на результаты. Оказывается, существует и обонятельное соперничество. В частности, когда нос субъекта подвергается воздействию различных запахов, одновременно чувствуется только один из них: подобно слуховой и зрительной системе, ноздри по очереди воспринимают то один, то другой одорант.

Обработка тактильной информации немного отличается, хотя воспринимающие касания органы в целом двусторонне-симметричны. Но исследования показали, что обработка сенсорной стимуляции требует не только приема и передачи местоположения тактильных раздражителей в мозг, но и того, чтобы эта локация была объединена с информацией о текущей позе или пространственном положении частей тела, испытывающих тактильные ощущения. Последнее требование проверяется визуально. Когда мы скрещиваем руки, обработка начинается с того, что мозг воспринимает обычную ориентацию рук, то есть левую руку — слева и правую руку — справа. Но, так как руки скрещены, эта позиция меняет восприятие, и при получении тактильных стимулов в этом положении рук восприятие и интерпретация раздражителя приобретают обратную ориентацию. Когда мозг, получая визуальную информацию, осознает, что руки скрещены, тактильная информация перераспределяется нужным образом. Промежуток времени между получением данных об изначально неправильной ориентации раздражителей и повторным отображением — критически важный показатель перераспределения. Эксперименты со скрещенными пальцами тоже указывают на аналогичный дефицит перераспределения, но в этой реакции не участвуют двусторонние анатомические структуры. Одно из основных различий

между реакциями скрещенных рук и скрещенных пальцев заключается в том, что при скрещенных руках дефицит перераспределения уменьшается с увеличением длительности воздействия, в то время как при скрещенных пальцах этого не происходит даже при стимуляции в одну секунду. Это отсутствие улучшения интерпретируется как основное различие между руками (двусторонними органами) и пальцами (односторонними).

Это явление называется тактильной иллюзией скрещенных рук (рис. 14.2), и, конечно, с ногами это работает точно так же. Чтобы разобраться с этим, провели дополнительные довольно странные эксперименты. Во-первых, путаница раздражителей по времени происходит только после перекрещивания конечностей на дистальном конце. Любое расположение раздражителей на ближайшей к месту скрещения не дает такого эффекта. Во-вторых, этот эффект можно нивелировать, если вместо собственных скрещенных рук из плоти и крови смотреть на нескрещенные резиновые руки. Существуют потенциальные различия между полами в проявлении этого феномена. Благодаря специальному тесту (он называется «стержень и рама») доказано, что женщины более визуальны зависимы, чем мужчины, и эта зависимость в пространственных вопросах может означать, что и на эффект искривления скрещенных рук женщины реагируют иначе.

Тест «стержень и рама» применяется уже более сорока лет¹ для оценки восприятия вертикального расположения предметов как функции визуальной ориентации. В тесте внутри плоской квадратной рамы изображен стержень². И раму, и стержень

¹ Соломон Аш и Герман Уиткин опубликовали результаты эксперимента по восприятию вертикали в *Journal of Experimental Psychology* в 1948 году.

² Помещенный в темную комнату человек видел перед собой светящуюся рамку и в ней — светящийся стержень. Экспериментатор из другой комнаты произвольно (не сообщая испытуемому) отклонял от вертикали рамку и стержень (независимо друг от друга). Испытуемый должен был привести стержень в вертикальное положение. Итог: кто-то ориентируется на зрительные ощущения (положение рамки), кто-то на проприоцептивные (положение собственного тела). Первых больше, вторые определяют точнее.

жень можно отклонить от вертикали. Когда и стержень, и рама расположены строго вертикально, у наблюдателя не возникает проблем с тем, чтобы правильно определить вертикальность стержня, он делает это безошибочно. Иллюзия создается путем отклонения рамы от вертикали относительно поля зрения наблюдателя. Восприятие человека изменяется, и он не может верно определить, какие именно предметы размещены вертикально. Стержень может быть расположен абсолютно вертикально, и, если смотреть на него без рамы, испытуемый именно так его и воспринимает. Но, как только стержень помещают в наклонную раму, тот тоже начинает казаться наклонным. Чем больше наклон рамы, тем сильнее иллюзия преувеличивает наклон стержня. В ходе теста испытуемый должен наклонить стержень так, чтобы привести его в вертикальное положение. Экспериментатор же в свою очередь может менять наклон рамы и тем самым измерять влияние иллюзии на результат. Женщины, воспринимая иллюзию и пытаясь исправить ее, больше полагаются на зрение. Поскольку для проведения теста требуются руки, его можно разнообразить — проводить либо с руками в обычном положении, либо со скрещенными руками. Самое простое объяснение разделения результатов эксперимента по половому признаку может заключаться в том, что мужчины и женщины по-разному решают пространственные проблемы.

До сих пор мы рассматривали конфликт или соперничество с определенной точки зрения. Когда мы начинаем изучать, как чувства взаимодействуют друг с другом, возникает новый набор примеров соперничества и решений для конфликтных ситуаций с поступающими сигналами. А еще сложнее обстоят дела с конфликтами и соперничеством, которые возникают при обработке высшими функциями мозга (такими, как память и эмоции) тех чувств, которые стимулированы раздражителями из внешнего мира. Было проведено множество важных исследований, направленных на выявление существующих в нашем мозге механизмов мультисенсорного восприятия. Пути передачи сигналов в мозге от одного чувства, такого как осязание или зрение, достаточно

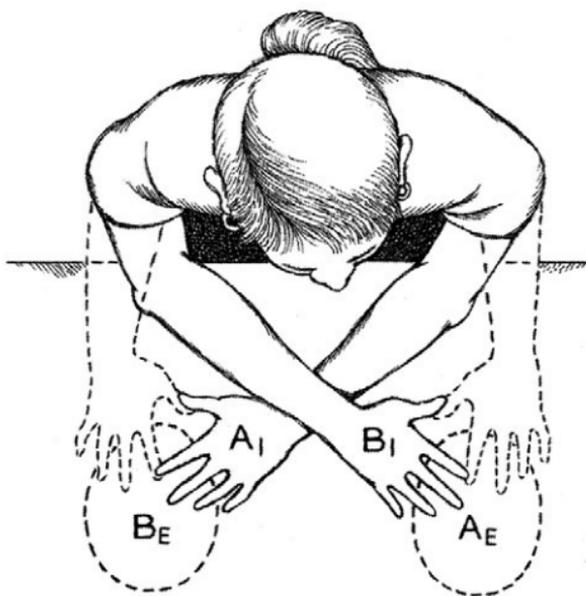


Рис. 14.2. Тактильная иллюзия скрещенных рук. Когда человек скрещивает руки и при этом раздражитель воздействует на одну из рук (B_I), мозг воспринимает этот сигнал как от другой руки (A_E), и наоборот

хорошо изучены и указывают на сложный маршрут от органов чувств, таких как глаза или уши, к мозгу и через него, что далее приводит к восприятию (это лучшее доказательство его кросс-модальной природы).

Чтобы точно описать эти пути, нужно знать многие области и отделы мозга. Я один из тех людей, которые говорят таксисту: «Просто отвезите меня по этому адресу, мне все равно как». По пути я замечаю какие-то знакомые места, но конкретные детали маршрута меня не интересуют. Иногда я плачу за поездку больше, чем планировал, но если подумать, эволюция работает аналогичным образом. Я буду использовать подход «просто отвезите меня туда», пытаюсь описать кросс-модальность чувств, чтобы обойтись без мельчайших подробностей анатомии мозга. Прежде чем вдаваться в детали кросс-модальности чувств, я расскажу пару историй. Есть люди, которые могут чувствовать запах формы, слышать цвета и ощущать вкус звуков (наряду с другими смешениями чувств). Эти уникалы обладают необычной связью чувств, называемой синестезией. Еще более удивительно проявление

кроссmodalности у людей, которые обычно не считаются синестетами, как большинство из тех, кто сейчас читает эту книгу.

Пять чувств (зрение, слух, осязание, обоняние и вкус) вкупе с чувством равновесия (вестибулярный аппарат) дают пятнадцать различных попарных сенсорных взаимодействий. Взаимодействия всех этих пар не были полностью изучены и, следовательно, поняты, но некоторые из них лучше проработаны, чем другие. Если начать исследовать более сложные взаимодействия, такие как кроссmodalность трех чувств, тема станет крайне запутанной. Рассмотрение всех возможных кроссmodalностей вылилось бы в длинную главу с массой повторов, поэтому здесь, чтобы подчеркнуть способность мозга обрабатывать данные в кроссmodalном режиме, мы остановимся лишь на самых интересных бинарных системах. Мои любимые экспонаты в научном выставочном центре (мы действительно в 2013 году включили один из них в экспозицию, посвященную мозгу, в Американском музее естественной истории) касаются зрительно-слуховой кроссmodalности. Когда вы подходите к экспонату в том музее, вы видите фотографию женщины в натуральную величину: она с зонтиком стоит на углу улицы под дождем. Визуальный стимул дополняется звуком — шумом дождя. Или нет? Если заглянуть за экспонат, можно увидеть реальный источник звука: на самом деле это шипящий на сковороде бекон!

Существуют тесты, в ходе которых испытуемому создают подобную иллюзию, и тот перестает различать, что слышит на самом деле — дождь или жарящийся бекон. Психологи используют эти тесты, чтобы определить источник зрительно-слуховой кроссmodalности. Один из таких тестов — иллюзия двойной вспышки — очень прост: перед испытуемым включается одна световая вспышка, сопровождаемая двумя звуковыми сигналами в быстрой последовательности. Большинство людей, проходящих этот тест, видят две вспышки света вместо одной. Время между двумя звуковыми сигналами — критический фактор для появления этой иллюзии: если оно меньше ста миллисекунд, субъект с большей вероятностью воспринимает две вспышки.

Иллюзия перестает работать при пересечении порога в сто миллисекунд, и именно этот четко зафиксированный временной промежуток позволил исследователям сделать вывод об универсальности данного фактора, определяющего взаимодействие зрения и слуха в мозге. Роберто Сесере, Герайнт Рис и Винченцо Ромей изучили, можно ли считать визуальное восприятие в условиях действительности результатом интеграции информации от нескольких органов чувств. В процессе интеграции каждая доля информации оценивается в режиме реального времени для получения «единой интерпретации события» как функции мозга и для формирования так называемых альфа-волн (см. вставку 14.2). Сесере и его коллеги предположили, что слуховые стимулы попадают в одну фазу альфа-волны и мозгу необходимо очень быстро решить вопрос зрительного и слухового соперничества. Мозг спешит сделать это до того, как следующая альфа-волна пройдет через затылочную долю. Именно эта синфазность слуховых стимулов и спешка мозга в принятии решения и есть причины того, что испытуемые наблюдают две вспышки света, когда звуковые сигналы следуют с промежутком меньше ста миллисекунд.

Есть две возможные причины такого странного поведения нашего мозга. Джесс Керлин и Кимрон Шапиро предполагают, что одна из причин — это «неудачное следствие» эволюционного процесса: соединение слуха со зрением в мозге, которое приводит к артефакту зрительного восприятия (второй вспышке света). Вторая причина куда более сложна и касается того, как работает наш мозг. Керлин и Шапиро ссылаются на функциональную причину этой иллюзии, предполагая, что наш мозг выполняет вероятностный анализ информации в соответствии с тем, что предложил преподобный Томас Байес, английский пастор XVIII века и любитель теории вероятности. Байес признал, что вероятность — это «произведение вероятности наступления события и вероятности проведения наблюдения при условии наступления события, деленное на безусловную вероятность проведения наблюдения».

14.2 | ЗАТЫЛОЧНЫЕ АЛЬФА-ВОЛНЫ

О затылочных альфа-волнах известно довольно много, потому что они являются наиболее очевидной физической формой волны, которую можно измерить в головном мозге. Свойство испускать волны — полезная функция мозга, и ее можно использовать для измерения многих характеристик высшей нервной деятельности. В частности, амплитуда или сила альфа-волны используется для измерения степени участия коры головного мозга в решении различных задач. Однако, как мы видели в предыдущих главах, волны имеют фазы, и оказывается, что их распределение для альфа-волн составляет 100 миллисекунд. Исследователи предполагают, что каждая альфа-волна, проходящая через мозг, доставляет определенную информацию, которая должна быть обработана. И эти данные не могут быть дополнены новыми сведениями до тех пор, пока через 100 миллисекунд не пройдет следующая волна.

Эта причудливая формулировка XVIII века просто предполагает, что при оценке вероятности чего-то, например вспышки света, необходимо рассчитать влияние информации о событии, полученной из наблюдений, и некоторых предварительных знаний того, что происходит, поделенных на воздействие происходящего. Современный язык не слишком упрощает понимание, да? Суть в том, что предварительное знание того, что происходит, становится очень важным при рассмотрении мира в байесовском контексте. Итак, согласно Керлину и Шапиро, мозг, оценивая вероятность события «второй звуковой сигнал сопровождается вспышкой», применяет байесовский подход, используя предварительное знание «звуковой сигнал сопровождается вспышкой света». Априорная вероятность вспышки света, сопровождающей звуковой сигнал, достаточно высока для того, чтобы мозг начал интерпретировать каждый звуковой сигнал как вспышку. Когда звук и вспышка разнесены по времени (то есть между ними про-

ходит более ста миллисекунд), априорная вероятность события «звуковой сигнал сопровождается вспышкой» оценивается мозгом как низкая, поэтому и вычисленная мозгом (на основе этой априорной вероятности) общая вероятность данного события очень низка. В этом байесовском сценарии мозг непрерывно делает вероятностные заключения о происходящих событиях, и, когда мы находимся в подвешенном состоянии и нам требуется дополнительная информация (например, в середине стомиллисекундной фазы альфа-волны), мы используем эту вероятность для формирования нашего восприятия событий. Я не знаю, какая версия мне больше нравится. «Неудачная» версия, на мой взгляд, не так неудачна, как предполагают Керлин и Шапиро. Для меня это просто эволюция, и она показывает, насколько мозг на самом деле представляет собой «его несовершенство». Но если мозг действительно принимает решения на основе байесовского анализа, это очень здорово.

Я уже говорил о некоторых кроссmodalных взаимодействиях осязания и зрения (случай со скрещенными руками), но существуют тактильные кроссmodalные взаимодействия и с другими органами чувств. Пожалуй, самый известный, но не менее удивительный пример тактильно-слуховой кроссmodalности связан с персонажами Кики и Буба (рис. 14.3). Но кроссmodalность звуков с формой или текстурой идет еще дальше, чем Кики и Буба. Когда антропологи исследовали названия животных и растений в языках коренных народов, они обнаружили удивительную связь: безобидные мелкие животные и мягколиственные растения имели мягко звучащие названия, в которых использовались мягкие согласные; жестко звучащие согласные используются в названиях опасных или хищных животных и колючих растений. И действительно, как мы скоро увидим, вкусы также могут быть кроссmodalно связаны со звуками и формами слов.

Кики и Буба — это нарисованные фигуры с отходящими от центра отростками. Кики — остроугольная фигура, а Буба — округлая, ее отростки похожи на вытянутые пузыри. Кики выглядит острой и строгой, Буба — мягкой и податливой. Если показать кому-то

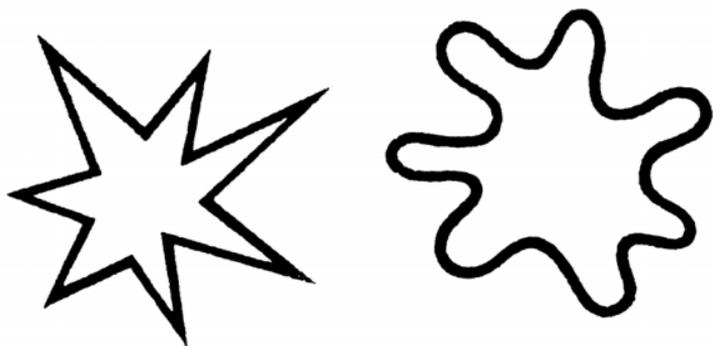


Рис. 14.3. Кики и Буба. Угадайте, кто где

двух- или трехмерные изображения этих фигур и попросить выбрать для каждой имя, подавляющее большинство людей свяжет имя Кики с острыми лучами, а Бубу — с амебообразными отростками. Эта ассоциация не зависит ни от возраста, ни от культуры, ни от языка: люди всех возрастов из разных стран угадывают, кто где. Резкий звук слога «ки» и мягкий «бу» связаны с формами фигур, скорее всего, через кроссмодальный процесс в мозге.

Но на наше восприятие влияют не только звуки, но и зрение. Когда мы видим что-то, к чему хотим прикоснуться, что хотим взять или, возможно, по чему хотим пройти, вполне логично, что перед предпринятой попыткой мы оцениваем вид и текстуру объекта. Если вялыми пальцами потянуться за рыхлым куском пищи, тот точно упадет, а если резво поскакать по скользкой поверхности, то определенно можно сломать себе шею. Таким образом, принятие тактильного суждения от визуальных стимулов вполне может быть важным аспектом выживания приматов. Уже более века в качестве зрительного инструмента для оценки текстуры и изучения взаимодействия тактильного восприятия и визуальных сигналов используется глянец объектов. Прибор Ингерсолла для оценки глянца бумаги, впервые выпущенный на рынок в 1922 году, применялся в то время и в психологических экспериментах для измерения блеска объектов. Но ученые быстро поняли, что глянец слишком многогранный параметр, он более сложен для измерения, и до недавнего времени исследования с использованием глянцевого параметра не проводились.

В настоящее время известно, что восприятие глянца представляет собой сложное взаимодействие тактильного ожидания и зрительного раздражителя. Используя устройство, которое может изменять как глянцевый внешний вид объектов, так и степень их скользкости, Венди Адамс, Иона Керриган и Эрих Граф провели эксперименты, чтобы раскрыть роль глянца в восприятии тактильных раздражителей. Эти исследователи смогли совместить блеск со скользкостью по континууму: «без блеска, без скользкости» на одном конце и «с экстремальным блеском и экстремальной скользкостью» на другом. Результаты исследования показывают, что участники интегрируют уровень блеска с уровнем скользкости объектов. В частности, люди указывают на увеличение блеска при увеличении скользкости. Обратный эксперимент, где глянцевитость уменьшена, а скользкость увеличена (контринтуитивная ситуация), практически совсем не изменил восприятия. Другими словами, парадоксальная крайность в представлении человека не воспринимается иначе: глянцевый предмет всегда расценивается как скользкий. Это как если бы мозг интегрировал сигналы от блеска и скользкости, чтобы сделать какой-то вероятностный вывод (привет, преподобный Байес!), искажающий восприятие скользкости и глянца.

Взаимодействие зрения, звука и осязания, о котором я говорил, довольно очевидно. Но есть также взаимодействия и кросс-модальности, которые включают равновесие, запах и вкус. Для равновесия зрение играет огромную роль, но не всегда. Помните вращающихся фигуристов, которые, используя зрение, переориентируют информацию из вестибулярной системы в зависимости от движения головы (см. главу 7)? Но эта зрительно-вестибулярная кросс-модальность работает только при определенных обстоятельствах. Недавние эксперименты с гальванической вестибулярной стимуляцией, или ГВС (см. вставку 14.3), действительно могут частично показать роль зрения в равновесии и продемонстрировать, как механосенсорная информация от вестибулярной системы во внутреннем ухе кросс-модули-

руется зрением. Как правило, чем лучше человек приспособлен к колебаниям, тем критичнее он относится к информации, поступающей из вестибулярного аппарата, и тем больше полагается на данные, предоставленные зрительной системой. Поэтому и постоянный подсознательный подсчет положения оси тела, которая поддерживает равновесие, производится с учетом высокого приоритета зрительной информации и потери интереса к сведениям, поступающим из вестибулярной системы. Фигуристы вынуждены тренироваться снова и снова, шлифуя пируэты и прыжки, чтобы приспособиться к этим удивительным движениям. Если человек не привык к подобному, то активное вращение тела способно посеять хаос в его чувство равновесия, и это будет происходить, пока он не отработает это движение

14.3 | ГАЛЬВАНИЧЕСКАЯ ВЕСТИБУЛЯРНАЯ СТИМУЛЯЦИЯ И РАВНОВЕСИЕ

Используя гальваническую вестибулярную стимуляцию, исследователи могут либо усилить, либо ослабить реакцию вестибулярной системы во время движения головы при колебаниях тела. Когда человек поддерживает равновесие, возникает типичная и измеримая механосенсорная реакция вестибулярного аппарата во внутреннем ухе. При помощи шлема, который способен ослабить или усилить сигнал вестибулярной системы в мозге, исследователи могут вызвать у испытуемого иллюзию того, что в неустойчивом положении тела его голова движется быстрее или медленнее, чем это есть на самом деле. Исследователи могут количественно оценить степень реакции испытуемых (с использованием зрения и без него), а также интенсивность, с которой люди будут пытаться компенсировать мнимое движение. Звучит это как описание отличного аттракциона, но результаты исследования очень помогли понять, что вестибулярная система иногда действует сама по себе, даже если она имеет информацию от визуальных раздражителей. Короче говоря, фигуристам-новичкам зрение не помощник.

неоднократными повторениями на тренировках. Мозг фигуристов-новичков не обладает способностью воспринимать вестибулярную и зрительную информацию с заново расставленными приоритетами, и поэтому вестибулярная система у них работает сама по себе.

Сенсорная информация бомбардирует нас со всех сторон, и большая часть этих данных избыточна и бесполезна — нейронный мусор, как обычно я это называю. Если бы наш мозг обрабатывал каждый бит поступающих извне сведений, он очень быстро сгорел бы от перегрузки. Когда потенциал действия от внешнего стимула поступает в наш мозг, мы специальным образом интерпретируем поступившие данные и протаскиваем через шум то, что нам действительно необходимо, по коротким путям обработки сенсорной информации. Например, большинство людей способны легко сфокусироваться на разговоре с кем-то даже в переполненной шумной комнате. И довольно часто нам приходится принимать быстрые решения, основанные либо на недостаточной сенсорной информации, либо на множестве противоречивых сведений. Например, многие оптические иллюзии — это не что иное, как заявление мозга: «Я сдаюсь, но вот лучшее, что я могу сделать». Эта глава как раз посвящалась некоторым феноменам, используемым для изучения интересного аспекта нашей способности чувствовать внешний мир, и умению мозга отсеивать сенсорный мусор. Именно этот природный дар позволяет нам воспринимать мир как можно более упорядоченно и лаконично.

ПАНИ КА МЕУЗА, КРЕМ-БРЮЛЕ И СИНЕСТЕЗИЯ

Как кроссмодальность действует на вкус и синестезию

Крем-брюле — лучший десерт для парня. Приготовьте своему, и он будет ходить за вами по пятам.

АЙНА ГАРТЕН, автор кулинарных книг
и ведущая передачи «Босоногая графиня»
(The Barefoot Contessa)

Вкус основан на хеморецепции, но оказывается, что он зависит и от других чувств, таких как зрение или осязание. Как-то в Палермо я бродил под открытым небом по знаменитому рынку Балларо и с удовольствием пробовал местные деликатесы. Там я наткнулся на торговца, который продавал популярное на Сицилии блюдо — пани ка меуза. Поверьте, выглядело это так себе: нечто, кипящее в баке для белья, было почти отвратительно на вид. Цвет варева был бледно-серым с зеленоватым оттенком, а мясо по текстуре напоминало рваную пористую губку. Сказать, что это выглядело несъедобно, — ничего не сказать, а уж когда мне объяснили, что пани ка меуза — это булочка с селезенкой, аппетит совсем пропал. Тут же я узнал, что странный серо-зеленый соус готовится из горловых хрящей и легких, и даже разглядел в булькающей жидкости нечто подобное. В тот момент я сильно засомневался: так ли необходимо пробовать эту сицилийскую штуку? Неудивительно, что первый кусок уличного фастфуда чуть не застрял у меня в горле — он был кислым и имел комковатую текстуру. Но я не сдался и решил провести простой эксперимент: закрыл глаза, попытался выбросить из головы предвзятое представление о том, какой вкус может иметь

губчатая серая еда, и откусил еще кусочек. Это не сильно помогло. С большой неохотой я прикончил свою пани ка меуза. Но позже на той же неделе, когда мои предубеждения поутихли, я попробовал этот деликатес снова. Теперь я могу сказать, что пани ка меуза — одно из самых лакомых и вкусных уличных блюд, которые я когда-либо ел. Каждый раз, когда я думаю о Сицилии, мечтаю вернуться на тот рынок в Палермо.

Отчасти эффект восприятия вкуса зависит также и от названия еды. На самом деле пани ка меуза звучит достаточно приятно для уха сицилийцев, поэтому тут к булочке с селезенкой никаких претензий. Маркетологи давно начали использовать хитрости кроссmodalности для повышения продаж своих товаров. Результаты исследований показали, что название продукта обладает огромной важностью в деле его продвижения, и маркетологи сумели выделить несколько общих закономерностей. Например, они определили один забавный факт: чем труднее потребителю произнести название винодельни, тем лучше ему кажется вкус вина, произведенного там, поэтому винодельни с более простыми названиями априори в проигрыше. Так что слог, используемый для описания еды, может довольно сильно повлиять на восприятие вкуса. Прибавьте к этому фактор тактильного кроссmodalного взаимодействия, и у нас получится очень сложная картина восприятия вкуса пищи. Мы уже видели, что тактильная информация и текстура еды важны для оценки вкуса, и это может означать, что и форма продукта способна существенно повлиять на наш выбор.

Психолог Чарльз Спенс был пионером в исследованиях вкуса и всю свою научную карьеру посвятил изучению кроссmodalности вкуса с другими чувствами. Он изучал звуки речи, связанные с шоколадом, — отличный пример его интереса к кроссmodalности и вкусу. Спенс и его коллеги искали любые ассоциации между шоколадом и содержащимся в нем какао с округлыми, острыми или угловатыми словами в разных культурах. Они обнаружили, что сладкие или шоколадные конфеты с низким содержанием какао почти всегда ассоциируются с круглыми словами с мягкими

носовыми звуками и гласными заднего ряда¹. Своего рода Кики и Буба вкуса. Такие слова, как «лула» и «манула», являются прекрасными образцами мягких или кругло звучащих слов, которые ассоциируются со сладким. Горький шоколад или шоколад с высоким содержанием какао ассоциируется с такими словами, как «туки» и «такете». Но неизвестно, что именно происходит в мозге при сопоставлении звуков и вкусов, хотя само отображение как факт доказано многочисленными исследованиями. Учитывая оригинальность Спенса в экспериментах и его интерес ко всему — от хруста чипсов Pringle's до шипящего звука газированных напитков, — можно заключить пари, что кроссmodalная природа многих из этих ассоциаций в ближайшее время будет изучена.

Большая часть моего первоначального отвращения к булочке с селезенкой была визуальной. Вероятно, этому поспособствовали и предупреждения родителей, которые в детстве говорили мне, что никогда нельзя есть серо-зеленое мясо. Однако рвотный рефлекс был вызван другим чувством, которое тоже стало частью кроссmodalных взаимодействий. Исследователи считают, что есть и тактильная составляющая в том, что мы пробуем. Эксперименты, в которых испытуемым дают пищевые объекты, связанные с особым тактильным воздействием, подтверждают это. Участникам предлагали одну и ту же еду в двух вариантах: с шероховатой поверхностью и гладкой. Блюда к тому же подавались на грубых или гладких тарелках. Исследователи использовали эксперимент с сервировочной тарелкой в качестве контрольного и обнаружили, что вид посуды действительно не влияет на вкусовые ощущения. А вот текстура еды оказывала значительное влияние на то, как испытуемые воспринимали вкус. Всякий раз, когда человек пробовал пищу с шероховатой поверхностью, она казалась ему более кислой, чем тот же самый, но гладкий продукт. Возможно, грубая текстура горлового хряща, замешанного в паника меуза, вызывала у меня похожее ощущение кислятины.

¹ Носовые согласные в русском языке — это «н» и «м», а также их мягкие варианты; гласных заднего ряда в русском языке два — «о» и «у».

Следующий вопрос: взаимодействуют ли обозначающие форму слова с кроссmodalностью восприятия вкуса? Ответ: да. В результате хорошо продуманных экспериментов ученые выяснили, что семантическое поле вкуса и форм содержит два основных кластера. Это такой причудливый способ сказать на языке статистики, что их эксперименты выявили две ассоциации слов и форм. Одна группа состояла из слова «сладкий» и фигур круглых форм. Другая группа включала формы, которые имели острые края, и вкусовые слова — «солёный», «кислый» и «горький». Используя эти ассоциации, исследователи рассчитали реакцию участников исследования на согласованные и несогласованные пары. Этот тест похож на эксперимент Струпа с формой/вкусом (см. вставку 15.1). В тесте Струпа испытуемому дают несколько продуктов, каждый из которых имеет определенные форму и вкус. Так, например, человеку дают следующее: круглый сладкий кусок какой-нибудь еды, затем кислый неровный кусок и, наконец, треугольный горький. Испытуемому предлагается назвать вкусы, при этом засекается время. Далее ему дают другие продукты разной формы: сладкое в форме звезды, что-то кислое овальной формы и нечто круглое и горькое — и снова просят определить вкусы. Когда форма и вкусовые сочетания несовместимы (например, форма звезды и сладкий вкус), человеку требуется больше времени, чтобы правильно определить вкус. Этот результат указывает на существование кроссmodalной связи вкуса и формы, выраженной через слова.

Очевидно, что слова — часть этих кроссmodalных взаимодействий. Но как насчет других звуков? Например, что там с музыкой? Достаточно посмотреть рекламу по телевизору, чтобы прийти к выводу, что музыка сильно связана с восприятием вкуса. Можно было бы утверждать, что существует некоторая эстетическая составляющая в выборе музыки в телевизионной рекламе, если предположить наличие эстетики в рекламе. Но при таком выборе также есть некоторые очень четкие кроссmodalные взаимодействия. Теперь мы пойдем еще дальше и определим, задействована ли музыка. И снова на сцену выходит Чарльз Спенс. Вместе

15.1 | ЭКСПЕРИМЕНТ СТРУПА

Классический вариант эксперимента Струпа — это визуально-семантический тест, который уникальным образом связывает слова с цветом. Вам предлагают два списка слов, где слова, а именно названия цветов, напечатаны разным цветом. В одном списке слова соответствуют цвету, поэтому слово «синий» будет синего цвета, слово «зеленый» — зеленого и т. д. Во втором списке цвета и слова перемешаны: слово «синий» — красного цвета, а «зеленый» — фиолетового. Человека, проходящего тест, просят перечислить цвета слов вслух. Можно легко и быстро сделать это, если название цвета совпадает с его визуальным цветом. Но для правильного обозначения цветов слов в перемешанном списке требуется больше усилий и времени. Тест Струпа — классический пример эффекта «команды соперников». Когда мы видим слово «красный» синего цвета, в мозгу возникает конфликт, который требует длительного обдумывания. Когда мы видим слово «красный» красного цвета, конфликта не возникает, и мы быстро принимаем решение.

с несколькими коллегами он исследовал потенциальную роль музыки в восприятии вкуса. В серии экспериментов Спенс и его коллеги показали, что сладкие и кислые вкусы связаны с высокими нотами, а горькие — с низкими. Даже музыкальные инструменты вызывают связь со вкусами. Например, звуки фортепиано связаны со сладостью, а тромбоны — с горьким и кислым вкусом.

В этих экспериментах ученые задаются вопросом: какие обозначающие вкусы слова связаны с основными единицами звука или музыки? Углубляясь в кроссmodalную роль музыки, Спенс и его коллеги рассматривали музыкальную композицию как потенциального участника кроссmodalности. Они попросили аудиобрендинговое агентство создать четыре музыкальных произведения, которые различались бы по высоте тона, резкости, плавности и перепаду настроения. Затем, используя так называемые

мый эксперимент с навязанным выбором, эти ученые попросили участников назначить каждому из четырех вкусовых слов четыре композиции. Аспект навязанного выбора в эксперименте состоял в том, что надо было сопоставить одно из вкусовых слов с одной из композиций таким образом, чтобы получились четыре уникальных соответствия. Потом, полагаясь на результаты первого эксперимента, ученые предположили, что должны быть некие правильные соответствия, например сладкий идет в паре с более высоким тоном, более мягким и медленным звучанием. А другие вкусовые слова будут ассоциироваться с соответствующим образом созданными композициями. Результаты показывают, что сладость подбирают к «правильному» составу значительно чаще, чем просто случайно, «соленое» слово — уже реже, а слова «горький» и «кислый» вообще мало кому даются. Оба этих эксперимента подтверждают гедонистическую модель кроссmodalности. Другими словами, сопряжение сладости с более плавной и мелодичной музыкой может быть основано на факторе удовольствия от вкуса и звука. В общем, умеренная сладость более приятна для мозга, чем горечь, кислота или соленость. Точно так же плавная и мягкая музыка выигрывает у прерывистого, резкого звука. Пересечение на уровне удовольствия от каждого компонента может стимулировать способность сочетать сладость с более приятной мелодией.

Эксперимент, который провели Спенс и его коллеги, был относительно сложным, потому что в нем сопоставлялись четыре вкуса с шестью видами музыки, то есть двадцать четыре возможные комбинации музыки и вкуса. Шесть видов музыки включали небольшие изменения: резкость вступления, плавность перехода, изменение высоты тона, отрывистость звуков, мягкость и темп игры. Например, высоту тона субъект мог менять в пределах гаммы, которую он контролировал от высокого тона до низкого. Испытуемым показывали одно слово, обозначающее вкус («сладкий», «кислый», «горький» или «соленый»), а затем просили найти, куда на скользящей шкале для шести аспектов музыки можно поставить это слово. Так, участнику исследования давали

прочитать слово «солёный», и он должен был найти тон, который соответствует этому слову. Затем, снова посмотрев на слово «солёный», нужно было найти соответствующую ему на скользящей шкале скорость, и так далее для всех четырех вкусовых слов и всех шести аспектов музыки. Удивительно, но все характеристики, кроме ускорения темпа музыки, показали значительное совпадение вкусов и слов. В некоторых случаях музыкальный аспект может соответствовать нескольким вкусам. Например, резкие на слух музыкальные произведения в значительной степени коррелировали со вкусовыми словами, причем «кислый» ассоциировался с очень резкими звуками, «солёный» — со звуками средней резкости, а «сладкий» — с самыми мягкими звуками. В целом «сладкий» соответствует более высоким нотам, более мягкому звуку, плавной музыке, медленным и менее резким мелодиям. «Кислый», напротив, ассоциируется с низким звуком, мягким, прерывистым, высоким темпом и резким звуком.

Последний эксперимент, разработанный Спенсом и его коллегами, учитывал возможные культурные различия, которые могут влиять на кроссmodalность. Ученые набрали испытуемых из США и Индии и повторили тест с принудительным выбором из четырех музыкальных композиций и четырех вкусов. Решение противопоставить индийцев и американцев было основано на культурном контексте музыки, предпочитаемой в их странах. Индийская музыка микротоновая, то есть в ней есть интервалы меньше одного полутона. Западная музыка, которую предпочитают в Соединенных Штатах, использует специальную двенадцатитоновую интервальную систему. Читая эти слова, можно подумать, что разница не столь очевидна, тем не менее эти два серьезных структурных различия обуславливают и совершенно разную музыку, и, соответственно, абсолютно разные музыкальные предпочтения, восприятие и обработку музыкальной информации. Результаты экспериментов показывают, что американцы лучше сочетают «правильную» композицию со вкусом, демонстрируя, что в кроссmodalности участвует культурный компонент. Помимо того что эти эксперименты говорят нам

что-то о кроссmodalности, они имеют очевидную маркетинговую функцию. Они указывают на то, что в интернете сейчас называется популярным, «довольно глупым, но безумно крутым» приложением Haagen-Dasz¹. В этом приложении в качестве таймера во время ожидания мороженого звучит классический концерт, чтобы вы немного расслабились, прежде чем съесть десерт. Компания могла бы тщательнее подойти к выбору концертов, если бы последовала совету Спенса и коллег о том, как сочетать музыку со сладким вкусом. Концерты в приложении, видимо, не оптимизированы с учетом характеристик композиции и сладкого вкуса. Впрочем, рэп может быть удачной музыкой для рекламы соленых продуктов, поскольку он прерывист и резок. И самое главное: если вы индийский маркетолог, не нужно сочетать классический концерт со сладким десертом «Расгулла»² в телевизионной рекламе.

Запах также может пересекаться со звуком и даже музыкой. И снова съевший собаку на этом вопросе Чарльз Спенс изучил с коллегами соотношения запаха со звуком. Для проверки точности кроссmodalности обоняния и музыки исследователи использовали ранее продемонстрированные обонятельные кроссmodalности. Например, хорошо известно, что запахи сочетаются с формами. Спенсу и его коллегам удалось соединить с округлыми формами такие запахи, как крем-брюле, а вот мускусные запахи к ним не подошли. Используя преимущества этих кроссmodalностей, ученые оценивали сильные стороны любой обонятельно-музыкальной кроссmodalности. В первой серии экспериментов были обнаружены сладкие, круглые и высокочастотные корреспонденции. Как и в случае со вкусом и музыкой, реакция, скорее всего, гедонистическая, ведь сладкий вкус, округлость и более высокий тон ассоциируются с приятными ощущениями. Вторая серия экс-

¹ Haagen-Dasz — американский бренд мороженого из высокого ценового сегмента.

² Расгулла — классический индийский творожный десерт, довольно приторный на вкус из-за добавленного сиропа.

периментов объединила музыкальные композиции с тремя запахами: засахаренный апельсин, крем-брюле и имбирное печенье. Большинство людей в этом исследовании легко сочетали запах засахаренного апельсина с соответствующей ему «правильной» музыкой. Однако люди случайным образом соотносили крем-брюле со всеми тремя музыкальными композициями. И очень странно, что имбирное печенье ни разу не соответствовало «правильной» композиции. Эти результаты свидетельствуют о кроссmodalности обоняния со звуками, особенно с музыкой, но, как показывает реакция на имбирное печенье, подобные взаимодействия, скорее всего, очень сложны.

К этому моменту мы рассмотрели десять из пятнадцати возможных бинарных кроссmodalных взаимодействий для шести чувств (звук и зрение, осязание и зрение, осязание и звук, равновесие и зрение, вкус и зрение, вкус и звук, вкус и осязание, обоняние и осязание, обоняние и зрение, запах и звук). Нам не хватает четырех пар для равновесия в сочетании с другими чувствами и еще одной пары: запах и вкус. Существование четырех отсутствующих пар с равновесием действительно трудно продемонстрировать, но я не удивлюсь, если Чарльз Спенс придумает способ выявить их, если обратит на это внимание. Оставшаяся пара — это запах и вкус. Хорошо известно, что эти два чувства тесно связаны друг с другом, и их перекрестная modalность не вызывает сомнений. Мы также рассмотрели некоторые перекрестные modalности с тремя чувствами, такими как вкус, звук и зрение. Но вывод должен заключаться в том, что «команда соперников» получает сенсорную информацию, генерируемую нашими органами чувств, и интерпретирует ее.

Прежде чем мы оставим в покое кроссmodalность, я хочу вернуться к Найджелу Туфнелу, ведущему гитаристу мифической хеви-метал-группы Spinal Tap, упомянутой в главе 7. У его знаменитых гитарных усилителей были регуляторы громкости, на которых максимальной отметкой громкости было число одиннадцать (рис. 15.1). Когда Найджела спросили, почему бы просто не пронумеровать уровни набора громкости от одного до десяти и указать

десять самых громких, он ответил: «Да, но есть тот, что на один громче, правда? Это не десять. Видите ли, большинство... знаете, большинство парней будут играть на отметке «десять». Но если ты уже дошел до десяти на гитаре... куда идти дальше? Куда? Некуда. Именно так. Что нам делать, если нужно... превзойти себя... знаешь, что мы сделаем? Именно. Добавим еще единицу». И то, что в насмешке Туффнела есть какой-то кроссмодальный смысл, продемонстрировал следующий эксперимент. Испытуемые подвергались воздействию некоего определенного звука, а затем их просили сравнить тот со вторым звуком — либо более громким, либо более тихим. Вместе со вторым звуком участнику эксперимента показывали число — либо небольшое (один, два или три), либо большое (семь, восемь или девять), а затем спрашивали: был ли основной звук громче или тише второго звука? Хитрость эксперимента заключается в том, чтобы показать это число одновременно со вторым звуком или с паузой между звуком и демонстрацией числа. Когда цифра и звук появлялись одновременно, а звуки были сопряжены с большими цифрами, испытуемые воспринимали звук более громким, чем в случае, когда звуки сочетались с маленькими цифрами. Однако, если отделить звук от числа паузой, эффект исчезает, и звуки, соответствующие семи, восьми и девяти, действительно громче, чем у меньших чисел. А значит, правда, что одиннадцать может быть громче десяти.

Я умолчал об одном важном моменте, касающемся всех этих экспериментов по кроссмодальности. Для участия в них не приглашали синестетов. В ходе экспериментов установлено, что эти феномены проявляются у людей без очевидных связей чувств, такой как у синестетов. И синестезия внесла большой вклад в наше понимание кроссмодальности и, что более важно, маршрута и способа прохождения в мозг потенциалов действия, исходящих от органов чувств (глаз, ушей или носа). Синестезия, как и кроссмодальные взаимодействия, о которых я только что говорил, имеет много разновидностей. По мнению многих экспертов по синестезии, это примерно от 65 до 150 видов. Возможно, самая точная оценка, сделанная Шоном Деєм, — это 80 видов. Чтобы охватить

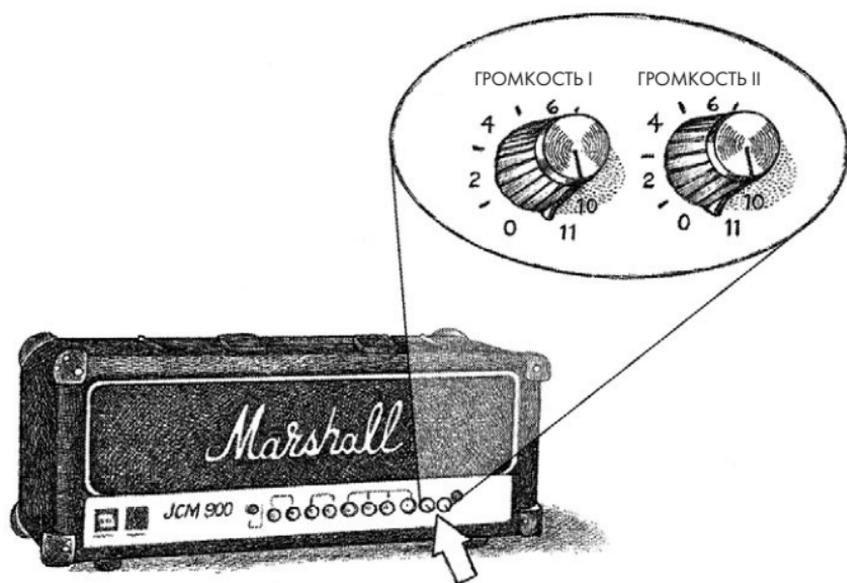


Рис. 15.1. Знаменитый усилитель Найджела Туфнела, который «доходит до одиннадцати» и показывает «на один громче»

их все, нужно было бы написать отдельную книгу, поэтому я коснусь только некоторых из этого списка, благодаря чему мы поймем кое-что о чувствах и, что тоже имеет значение, разберемся в работе нашего мозга, который создает восприятие и в конечном счете сознание.

Каждый вид синестезии состоит из индуктора и ответа. Индуктор можно сравнить с триггером синестетического опыта, без этого не может возникнуть синестетическая реакция. Если такой индуктор существует, то он действует так, как следует из названия: индуцирует сенсорный отклик, который не является частью общей реакции, специфичной для индуктора. Ответ — это чувственная или сенсорная реакция, которая возникает в результате присутствия индуктора. Например, наиболее распространенная синестетическая реакция — это когда цифры или буквы (известные как графемы) действуют как индукторы и имеют цвет как ответ. Более 60% людей с явными синестетическими способностями имеют графемно-цветовое сопряжение. На самом деле, для того чтобы определить, синестет ли человек, достаточно проверить именно эту пару. Также оказывается, что, если человек

синестет, связывающий определенную пару индуктор-ответ, он, скорее всего, может быть синестетом и в отношении другой или даже нескольких других пар.

Сначала считалось, что синестезия чаще встречается у женщин. Соотношение женщин и мужчин среди синестетов различается в зависимости от того, к какому эксперту обращаются за консультацией, и колеблется от шести к одному до одного к одному, когда нет никакого преимущества женщин. Шон Дей предполагает, что синестеты составляют примерно 4% населения, но это значение тоже варьируется в зависимости от исследований и исследователей. Отчасти сложно определить точное количество синестетов из-за того, что нельзя в оценках учитывать тех, кто просто утверждает, что обладает этой способностью. Было разработано несколько продуманных до деталей тестов, помогающих определить подлинность таких утверждений. Одним из основных инструментов обнаружения синестезии служит модифицированный тест Струпа. Единственная проблема в его использовании состоит в том, что некоторые несинестеты могут натренироваться употреблять те слова, которое они видят, для описания цвета, и тогда тест их определит как синестетов. Некоторые люди, которые обучились этой способности (либо целенаправленно, либо просто подвергшись в жизни воздействию пары индуктора-ответа), могут «обмануть» такой тест и будут считаться синестетами. Наиболее заметными из таких ложных синестетов являются люди, которые с детства помнят цвета магнитных букв на холодильнике и сохраняют ассоциацию цвета магнита с буквами алфавита. Детские азбуки могут вызвать такую же ложную графемно-цветовую синестетическую реакцию.

Наиболее широко используемые тесты для обнаружения синестезии — это тест на подлинность (TOG) и его улучшенная и переработанная версия (TOG-R). Эти тесты основаны на способности потенциального синестета систематически повторять синестетический ответ при испытаниях в разное время. Так, например, предполагаемому графемно-цветовому синестету дают длинный список графем, включающий слова, дни недели, цифры

и буквы алфавита. После упоминания каждой графемы испытуемому предлагается описать свое представление о ней. В разных вариантах теста будут использоваться разные индукторы, но реальная суть теста заключается в повторении графем в разных временных точках. Дополненная версия теста представляет собой более сложный и точный метод тестирования синестезии, который также был перекрестно проверен с помощью большой выборки известных синестетов. Тест Струпа, упомянутый ранее, был предложен в качестве потенциального способа обнаружения синестезии. Помните, что этот тест вызывает путаницу, когда несинестеты пытаются оценить цвет в конфликтной ситуации. Когда несинестетам дают сложные варианты, например слово «синий», напечатанное цветом, отличным от синего — скажем, зеленым, — они путают цвет слова и используют само слово, в данном случае «синий», чтобы описать что-то зеленое. Синестетов нельзя обмануть тестом Струпа.

Ученые изучают синестезию уже почти двести лет. Первые исследования, опубликованные в 20-х годах XIX века, были проведены синестетом, и его труд был частично основан на наблюдении за собой. Это явление вызвало большой интерес, но тогда никто не стал погружаться в подробную проработку феномена, и только в конце XIX века двоюродный брат Чарльза Дарвина Фрэнсис Гальтон впервые занялся психометрикой и возможной генетикой синестезии.

Гальтон был известной фигурой в викторианских научных кругах: эрудит, специалист во многих областях, блестящий статистик, если учитывать доступный на то время математический арсенал. Психологи считают Гальтона своим, ведь именно он изобрел многие ранние статистические инструменты, применявшиеся в популярной тогда науке — психометрии. Синестеты представляли особый интерес для Гальтона как психолога, и он первым доказал, что синестезия передается по наследству. Он также ясно показал, что не у всех синестетов возникают одинаковые цветовые ассоциации в задачах с одинаковыми графемами. Кроме того, он настаивал, что генетику следует считать научной дисциплиной.

К сожалению, он также защищал и продвигал ныне дезавуированную лженауку под названием евгеника¹. Именно Гальтон и дал ей это название. А вот хотя феномен синестезии и представлял для него большой интерес, автором термина он не был. Определение синестезии, скорее всего, принадлежит Жюлю Милле, который дал название явлению в 1892 году. Специалист по литературе и культуре конца XIX века Эрика Фретуэлл указала, что синестезия и евгеника были связаны вместе, конечно, отчасти благодаря Гальтону, но и как результат царивших в то время общественных нравов. Викторианские интеллектуалы были зациклены на видовых различиях человека, а синестезия предложила еще один набор критериев для их характеристики, и поскольку она основывается на работе нейронов и мозга, то ее связь с различиями сильнее, чем у генетики.

Привязка к евгенике стала неудачной ассоциацией для синестезии. Но с момента упадка евгеники изучение синестезии открыло множество путей исследования нейронных процессов, и не нужно приписывать ей никакой вины за первоначальную связь с лженаукой. Тем не менее исследования синестезии почти прекратились в начале XX века, когда евгеника вышла из моды. К счастью, за дело снова взялись в конце 80-х годов прошлого века, и акцент на синестезии в генетическом контексте привел к нескольким достижениям в том, как мы рассматриваем этот феномен. Гальтон отметил наследственность синестезии, но ему не хватало инструментов, чтобы определить ее генетическую основу. Кроме того, половая принадлежность, часто связываемая с синестезией, на некоторое время ввела в заблуждение ученых относительно местоположения генов, участвующих в этом явлении. Если, как предполагают некоторые исследования, пол играет такую важную роль, это может означать, что признак связан с X-хромосомой подобно характеристикам тетрахроматического

¹ Евгеника — учение о селекции применительно к человеку, а также о путях улучшения его наследственных свойств. Учение было призвано бороться с явлениями вырождения в человеческом генофонде.

зрения, рассмотренным в главе 9. Раннее наблюдение Гальтона о синестезии, присутствующей в разных поколениях одной семьи, также сыграло свою роль в попытке раскрыть генетическую основу этого феномена. Форма синестезии, которая называется синестезией цветовой последовательности, была изучена в двойном исследовании в 2015 году учеными Ханной Босли и Дэвидом Иглманом.

Эта форма синестезии проявляется у монозиготных (однойцевых) близнецов на 74%, а у разнородных (фратеральных) — на 36%. Если бы этот признак полностью контролировался генетикой, то однойцевые близнецы обладали бы 100% наследственностью. Если признак не был унаследован, то он должен появиться в любом виде близнецов на гораздо более низком уровне согласованности. Наследуемость, проявляемая на 74% у однойцевых близнецов в этом исследовании, предполагает, что этот вид синестезии имеет генетический компонент, но он не является полным, и что выражение признака имеет значительный компонент окружающей среды. Для другого типа синестезии используют подход полногеномного поиска ассоциаций.

Современные исследования генома, основанные на полногеномном поиске ассоциаций, используют целые последовательности генома референтных популяций и последовательности особей с интересующим признаком. Эти геномы исследуются с учетом позиций, которые различаются между контрольной группой и людьми с чертой, называемой однонуклеотидным полиморфизмом (или SNP; см. главу 8). Когда хромосомы клетки зародыша человека реплицируются, чтобы получились сперма и яйцеклетки, происходит рекомбинация, или генетический обмен информацией, между хромосомами в клетках, унаследованных от родителей. При этом нарушается последовательное расположение однонуклеотидных полиморфизмов с признаками в зависимости от того, насколько близок признак к этому полиморфизму. Если полиморфизм и признак очень близки друг к другу на хромосоме, то рекомбинация, или перестановка признака и полиморфизма, будет происходить нечасто и признак, как говорят, будет связан с ним.

Таким образом, для закрепления ассоциации требуется показать, что определенный полиморфизм или несколько полиморфизмов связаны с этим признаком. Кроме того, если мы можем определить, где полиморфизм находится на хромосоме, можно связать определенные гены в области полиморфизма с признаком.

Поиск полногеномных ассоциаций показывает, что один вид синестезии (прямая графема — цветовая синестезия) может быть связан с четырьмя из двадцати трех хромосом человека (ни одна из них не половая хромосома X и Y), а другой вид (синестезия цветной последовательности) — с хромосомой 16. Из четырех хромосом в первом случае, которые показывают связь с синестезией, наиболее значима хромосома 2. Остальные три хромосомы (5, 6 и 12) демонстрируют вероятную связь. Чтобы показать возможности и подводные камни этого подхода, рассмотрим некоторые из генов, близкие к связанным однонуклеотидным полиморфизмам на хромосоме 2, которые ассоциируются с синестезией цвета прямой графемы. Поиск генов, связанных с тем или иным признаком, немного напоминает поиск иголки в стоге сена, как мы уже выяснили на примере Чарльза Лупски и синдрома ШМТ в главе 8. Если связь найдена, то «стог сена» сильно уменьшается, но фактор удачи все еще в некоторой степени присутствует. К счастью, 80% из двадцати тысяч (или около того) генов в человеческом геноме имеют известные, точно описанные функции. Для этих характерных генов выявлены многие параметры: расположение, где ген выражен; как именно кодируемый геном белок работает в развитии и в обычной физиологии; как этот белок работает в биохимических путях и другие параметры. Итак, какие же гены нам следует искать рядом с однонуклеотидными полиморфизмами, связанными с этим признаком? Одна очевидная категория — это любой ген, участвующий в работе нашей нервной системы, или гены, влияющие на развитие нашей нервной системы. Другой категорией могут быть гены, связанные с неврологическими расстройствами или другими аномалиями неврологического характера.

Оказывается, что полиморфизмы, связанные с синестезией на хромосоме 2, находятся в той же области, что и гены, связанные с аутизмом. Люди с расстройством аутистического спектра испытывают сенсорные аномалии, и синестезия часто становится их вторичной особенностью. У них синестезия встречается гораздо чаще. Наконец, используя функциональную магнитно-резонансную томографию (фМРТ), исследователи увидели, что слуховые стимулы возбуждают одни и те же слуховые и зрительные области мозга как у людей с аутизмом, так и у синестетов. Что касается генов-кандидатов, то ген, связанный с синестезией на хромосоме 2, называемый TBR1, участвует в передаче другим генам нервной системы информации, когда им следует проявляться. Другими словами, TBR1 контролирует несколько генов, играющих важную роль в развитии нервной системы, включая ген, который называется рилин, участвующий в формировании коры головного мозга. Другой ген, вносящий свою лепту в нейронные процессы (который также находится в области генома со связанными полиморфизмами), называется SCN1A. Этот ген кодирует белок, находящийся в мембране синапсов и участвующий в обработке потенциалов действия, проходящих через синапсы. Люди с измененной формой этого гена страдают от эпилептических припадков. Если вернуться к аутизму, то ученые выяснили: у людей с подобным расстройством встречаются редкие варианты TBR1 и SCN1A. Хромосома 16, упомянутая ранее, также имеет однонуклеотидные полиморфизмы, связанные с синестезией цветной последовательности. Этот вид синестезии, вызванный последовательностями графем, таких как ABCD, для воспроизводства цветов, очень разнится от графемно-цветовой синестезии, поэтому неудивительно, что он может быть найден на других хромосомах, отличных от тех, что несут графемно-цветовой тип. Шесть генов в этой области участвуют в развитии и поддержании нервной системы в коре головного мозга. Но, когда эти гены были тщательно изучены на предмет различия между синестетами и несинестетами, ни одно из изменений не смогли связать с этой чертой.

В то время, когда писалась эта книга, я водил своего двухлетнего сына к врачу для проверки слуха. Ему только вставили в уши трубки, чтобы отвести жидкость, ухудшающую слух. Я немного скептически относился к процессу проверки слуха у двухлетнего ребенка. Как они заставят его показать, каким ухом он слышит звук? У моего сына одним из побочных эффектов нарушения слуха стала задержка речи, и он, конечно, не мог ничего сказать сам, как это делал, к примеру, я во время последней проверки моего слуха. Поскольку мой сын — обычный двухлетний ребенок, меня попросили подержать его во время теста. Я поразился, насколько точно специалисты интерпретировали движения его головы и глаз, чтобы узнать, каким ухом он слышит звуки. Исследователи, использующие аналогичные подходы, теперь могут тестировать двухмесячных детей и проверять, как у них работают сенсорные восприятия. Можно было бы подумать, что эти тесты довольно просты, однако, для того чтобы понять мозг двухмесячного малыша, требуется приложить немало умственных усилий. Конечно, младенцы не знают, что такое буквы или цифры, но исследователи разработали адаптированную для двухмесячных детей версию теста для определения графемно-цветовой синестезии. Двухмесячный ребенок может ассоциировать формы с цветами. Если ребенок связывает треугольник с красным цветом, он не будет четко различать треугольник, расположенный на красном фоне, но будет ясно видеть треугольник на зеленом фоне.

Хитрость теста, как и в случае со слуховым тестированием моего сына, заключается в том, чтобы интерпретировать реакцию двухмесячного ребенка, которому эти фигуры показывают. Оказывается, дети долго и пристально смотрят на что-то интересное, и фигуры, такие как треугольники и квадраты, гораздо интереснее для них, чем ровный красный фон. Так, если ребенок ассоциирует треугольник с красным цветом, а треугольник представлен на красном фоне слева и зеленом фоне справа, то фигура справа будет более заметной и, соответственно, интересней и все внимание будет сосредоточено исключительно на ней. Если

поменять фигуры местами, то ребенок должен начать смотреть влево. Почти все дети смотрят на эти фигуры целенаправленно, причем это происходит и при повторных испытаниях — и в тот же день, и в другие дни. У этого исследования есть два интересных вторичных результата, показывающие, как реакции ребенка сообщают нам о синестезии. Во-первых, дети улавливают красно-зеленые контрасты в гораздо более раннем возрасте, чем желтые и синие. А во-вторых, по мере роста ребенка синестетический эффект имеет тенденцию к снижению.

В совокупности эти данные показывают, что большинство детей — если не все — синестетики сразу после рождения. Это наблюдение называется гипотезой неонатальной синестезии. Причина, по которой дети видят красно-зеленые изображения раньше желто-синих, заключается в том, что в мозге сначала развиваются связи, необходимые для восприятия красного и зеленого, а потом уже для желтого и синего цветов. Последнее наблюдение за снижением синестезии у растущих малышей требует понимания, как развивается мозг в младенчестве и у детей.

Развитие мозга имеет две основные фазы. Мы рождаемся, имея почти все нервные клетки, необходимые нам в жизни. Исследования, изучающие нейронные связи этих клеток, показывают, что в первой фазе те довольно беспорядочно соединены друг с другом, образуя огромное количество контактов через синапсы. Такие синаптические связи пересекают сенсорные области мозга и, по существу, соединяют различные органы чувств. Вторая фаза происходит по мере развития ребенка и характеризуется процессом, известным как сокращение. Нейронные связи, которые реализуют универсальную неонатальную синестезию, отсекаются, оставляя только те, что обрабатывают исключительно визуальную информацию. Другие нейроанатомические и нейрофизиологические данные подтверждают этот взгляд на гипотезу неонатальной синестезии.

У младенцев также наблюдается другая синестетическая система — цветовой слух (где определенные тона звука соединены с определенными цветами или формами). Мы уже видели,

обсуждая кроссmodalность, что более высокие тона обычно ассоциируются с остроконечными формами (такими, как у Кики), а более низкие — с округлыми (как у Бубы). При этом виде синестезии высокие тона также сочетаются с меньшими формами, занимающими «более высокое положение в пространстве», а низкие звуки — с большими, «расположенными ниже» формами. В этом случае определение реакции ребенка имеет решающее значение, и оказывается, что тест вполне возможно провести, потому что дети любят смотреть на вещи. Таким образом, если ребенку показывают визуальное изображение, в котором форма превращается из подобной Бубе (амебовидной) в похожую на Кики (острую и колючую), а сопровождающий картинку звук переходит от низкого тона к высокому, реакция ребенка должна быть иной, чем в том случае, когда визуальное изображение то же самое, но звуки переходят от высокого тона к более низкому. В частности, поскольку визуальный спектр при переходе от Бубы к Кики, идущий в паре с переходом от низкого звука к высокому, согласован, а тот же визуальный спектр в паре с переходом от высокого звука к низкому — нет, ребенок будет более внимателен и в варианте первой комбинации будет смотреть дольше, чем в варианте второй комбинации. В другом тесте для выявления такого рода синестезии ребенку показывают яркоокрашенный шар, движущийся в пространстве вверх и вниз. Одновременно с движением шара слышатся звуки, идущие либо от низких тонов к высоким, либо от высоких тонов к низким. Опять же, если слуховая синестезия работает, ребенок должен предпочесть сочетание движения мяча в нижнем (верхнем) положении с низким (высоким) звуком, а не наоборот. Все дети в возрасте от трех до четырех месяцев действительно обращают больше внимания на согласованное визуально-звуковое сопряжение, чем на несогласованное, и это дает возможность предполагать, что младенцы синестетичны в отношении связей высоты тона и положения предметов в пространстве.

Ранее я уже говорил, что существует более восьмидесяти видов кроссmodalной синестезии. Для того что рассмотреть каж-

дый из них, пришлось бы часто повторяться, поэтому оставшаяся часть этой главы будет посвящена тем аспектам синестезии, которые помогут нам лучше разобраться с чувствами.

Для начала давайте рассмотрим исследования, которые связывают синестезию с анатомией мозга. Благодаря визуализации мозга можно исследовать несколько вещей. Прежде всего определить в мозге ту область, где обрабатывается специфическая сенсорная информация. И что еще более важно, с помощью методов визуализации мозга в первую очередь можно объяснить, почему же возникает синестезия. Как следует из исследований младенцев, фактором, способствующим развитию синестезии у человека, становится близость нейронных связей. У новорожденных эти близкие связи есть, но по мере развития ребенка они сокращаются. У истинных синестетов близкие связи не сокращаются и остаются на всю жизнь. Самые ранние исследования синестетов с помощью визуализации мозга были сделаны в 80-е годы XX века. Человек, которого исследовали на наличие синестезии, вдыхал смесь радиоактивного ксенона с кислородом. Ксенон — инертный газ, он безвреден для человека, но его изотоп можно проследить с помощью тех же методов, которые используются для фиксирования рентгеновских лучей. Для обнаружения в мозге изотопа ксенона (и, следовательно, кислорода) во время синестетической активности на человека надевали головной датчик с огромным количеством рентгеновских детекторных устройств. Во время этих тестов испытуемый вдыхал кислород с ксеноном, затем надевал датчик, после чего подвергался воздействию синестетического индуктора. Этот метод позволял обнаружить повышенную активность мозга, но делал это довольно грубо. Эксперименты (с использованием методов и знаний более чем тридцатилетней давности) показали, что кора головного мозга испытывает повышенную активность, но узнать точно, как это происходит, было невозможно.

С изобретением позитронно-эмиссионной томографии (метода функциональной визуализации, используемого в радиационной медицине для выявления метаболических процессов в организме), МРТ, а затем диффузионно-тензорного метода (который предоставляет информацию о белом веществе мозга, или аксонах) исследо-

ватели смогли точнее измерить активность мозга во время синестетических переживаний. Графемно-цветовая синестезия (одна из наиболее распространенных форм настоящей синестезии) была в центре внимания детальной проверки гипотез о том, как работает этот феномен. Лучше всего это получилось сделать с помощью визуализации, в частности фМРТ, которая выделяет участки мозга, активированные определенной функцией. По сути, изображение мозга окрашивается в различные оттенки в зависимости от уровня активности, вызванной действием или функционированием в результате раздражителя. Первые фМРТ-исследования синестетов показали четкую корреляцию графемно-цветовой синестетической активности с теми областями зрительного пути, которые соответствуют функции обработки цвета. Более поздние исследования фМРТ применялись для проверки гипотез о природе синестетической активности, в отличие от простых экспериментов по окраске мозга, которые проводились изначально.

Одна из наиболее популярных и логичных гипотез, которую можно проверить, касается процесса перекрестной активации, который предполагает иную картину мозговой деятельности, нежели другие модели синестезии. Перекрестная активация вызывает мозговую деятельность в двух разных частях мозга: в одной из них обрабатывается сигнал индуктора, а во второй активируется ответ. Самый последний подход, используемый для изучения синестезии, — диффузионно-тензорный метод, по состоянию на 2014 год с его помощью было проведено не менее семи исследований. Как я говорил в главе 10, этот метод может точно определить нейронные связи, которые проявляют активность во время специфической нейронной деятельности. Ранние результаты с использованием как фМРТ, так и ДТМ указывают на возможную необходимость локализованной функции мозга и связности, но, к сожалению, интерпретация данных затруднена, потому что существует очень много вариаций в синестетической активности даже среди графемно-цветовых синестетов.

В 2015 году Жан-Мишель Хупе и Мишель Дожат провели метаанализ всех опубликованных исследований синестезии головного

мозга. Их выводы прекрасно сформулированы в следующем заявлении: «Мы до сих пор не нашли никаких четких эмпирических доказательств о нейронных коррелятах субъективного опыта синестезии. Мы не обнаружили никаких структурных или функциональных аномалий в мозге синестетов, которые могли бы объяснить синестезию. На наш взгляд, большинство опубликованных на сегодняшний день исследований показывает, что мозг синестетов функционально и структурно схож с мозгом несинестетов». В сущности, синестезия очень сложна, и, возможно, нам нужен новый теоретический подход к проблеме, чтобы понять, как различные формы синестезии работают и как они связаны с устройством и особенностями функционирования мозга. Похоже, что синестезия — это та загадка, ответ на которую мы пока не нашли, и она подобна таинственному природному явлению: нам всегда есть чему поучиться.

Вероятно, у нас есть больше чем пять аристотелевских чувств плюс равновесие, на которых я сосредоточивался до сих пор. Но возможно ли, что «большая шестерка» на самом деле больше чем просто шестерка? Есть несколько областей мозга, где пересекаются пути для каждого чувства. Зрение, например, обрабатывает все виды аспектов этого чувства, включая цвет, оттенок, ориентацию, движение и т. д. Во многих отношениях наиболее распространенный синестетический феномен — графемно-цветовая синестезия — действительно почти не характерен для всех других синестезий. Это то, что называется интрамодальной синестезией, потому что нужно видеть, чтобы визуализировать буквы и цифры, и это требование затем вызывает еще одно визуальное совпадение. Со слухом все по-другому, и недавние синестетические исследования показали, что специфические аспекты слуха могут быть автономными. Довольно известна иллюзия слуха, называемая иллюзией (эффектом) Доплера. Она обнаружена в 1842 году и наглядно демонстрирует, как чувство слуха довольно тесно связано с различными характеристиками — громкостью звука и высотой тона.

Иллюзия Доплера возникает, когда человек слышит звук, интенсивность которого непрерывно возрастает с течением времени.

Это может произойти, когда вы стоите неподвижно и звук усиливается с постоянной скоростью или если вы стоите неподвижно, интенсивность звука постоянна, но его источник приближается к вам (или удаляется от вас) с постоянной скоростью. Когда человек подвергается звуковому воздействию такого рода, то слышимая им высота тона увеличивается по мере увеличения громкости звука. В этом случае высота тона на самом деле не увеличивается, но растет громкость. Эти два аспекта слухового восприятия — громкость и высота тона — конкурируют за право интерпретировать звук. В случае эффекта Доплера мозг позволяет громкости выигрывать конкуренцию за определение реакции на тон. Эта интермодальная синестезия находится в сильном контрасте со всеми остальными восьмьюдесятью синестетическими интермодальными синестезиями и предполагает, что по крайней мере слух действительно может быть интерпретирован как два чувства.

Есть еще две синестетические странности, благодаря которым мы в конечном итоге сможем выйти за рамки понимания этого феномена. Обе они несколько противоречивы и основаны на гораздо меньших размерах выборки, чем более известные формы синестезии, такие как графемно-цветовая. Первая странность относится к нейронному феномену, который, по сути, находится в категории сам по себе. Двадцать лет назад Джакомо Риццолатти и его коллеги заметили нечто интересное у изучаемых ими макак. Ученые оценивали нейронные сигналы в мозге этих приматов и регистрировали электрофизиологию отдельных нервных клеток, когда макаки тянулись к пище или другим предметам. Как ни странно, когда макаки наблюдали, как человек или другая обезьяна тянется к предмету, активность проявляли те же самые нервные клетки. Нейроны, участвующие в этом странном явлении, получили название зеркальных нейронов. Другие исследователи позже установили, что существуют зеркальные нейроны не только для движения рук, но и для мимики и движений рта. До сих пор среди нейробиологов зеркальные нейроны используются для лучшего понимания различных когнитивных механизмов, таких как осознание целей организмами и эмпатическое поведение. Также с их помощью исследо-

вали аутизм. Но самая последняя работа, посвященная феномену зеркальных нейронов, была связана и с определенными видами синестезии. При зеркальной сенсорной синестезии люди, которые видят, как к кому-то прикасаются, на самом деле чувствуют, что прикасаются к ним. Таким образом, это включает в себя визуальную индукцию, за которой следует ответное тактильное ощущение.

В конце скажу, что в литературе содержится несколько упоминаний об эмоциональных реакциях, связанных с ощущениями. Однако доказательства этой синестетической странности весьма скудны. У одного человека определенные виды тканей вызвали очень специфические эмоциональные реакции, например джинсовая ткань была связана с депрессией. В характерной графемно-цветовой связи некоторые люди с этим видом синестезии также будут связывать эмоции с ответом графема-цвет. В 2013 году исследователи работали с пациентом, у которого в результате перенесенного инсульта был поврежден таламус. Этот человек сообщил об отвращении, возникавшем у него при чтении слов, напечатанных синим цветом, и о неприятном чувстве, когда слова были написаны желтым. Благодаря этому впервые узнали о случае приобретенной синестезии, включающей эмоцию и графемно-цветовую синестезию. Еще более интересной была реакция этого человека на духовые музыкальные инструменты (в частности, на тему из фильма о Джеймсе Бонде), которую субъект описал как доводящую до оргазма. Оба этих явления действительно довольно странные. Мы отмечали, что наш мозг недостаточно совершенен в умении справляться с дуальностью, кроссmodalностью и синестезией, а теперь мы можем увидеть, что наш мозг обладает связями, достаточными, чтобы заставить определенные эмоции и воспоминания и другие аспекты высших когнитивных процессов принимать участие в интерпретации внешнего мира. То, как мы задействуем эмоции и воспоминания в игре восприятия, удивительным образом раскрывает то, как наш мозг постигает мир.

КОННЕКТОМЫ

Как работает мозг при кроссmodalных
взаимодействиях

Запах, в отличие от остальных чувств, удивительно мощно вызывает воспоминания, и жаль, что мы так мало используем это свойство.

РЕЙЧЕЛ КАРСОН, эколог и писатель

Преобладающие на нашей планете одноклеточные организмы довольно просты по сравнению с позвоночными и чувствуют среду обитания достаточно обрывочно. Но они точно так же, как и все другие формы жизни, прошли свой эволюционный путь. И хотя биологию одноклеточных нельзя считать совершенной (эволюция не стремится к совершенству), эти организмы нашли решения проблем, которые возникали у них по ходу развития при взаимодействии с окружающей средой (эволюция стремится найти решения). У некоторых одноклеточных организмов механизмы восприятия внешнего мира устроены довольно просто, но им хватает этого для выживания и передачи сущности вида (то есть генома) последующим поколениям. Процесс восприятия основан на нескольких чувствах: чувстве кворума — способности посчитать присутствующих рядом представителей того же вида; ощущении присутствия организмов, которых следует опасаться (или употреблять в пищу); ощущении присутствия организмов, с которыми можно обменяться ДНК. Есть и еще несколько других особенностей, достаточных (при всей их простоте) для выживания. Микробы имеют весьма ограниченное восприятие окружающего мира, и у большинства из них оно довольно узкое. Вероятно, ощу-

щение наличия рядом хищника — единственное, что им следует «понимать», поэтому многие микробы имеют одномерное восприятие внешнего мира.

Организмы становились все более сложными, поэтому и их средства восприятия окружающей среды делались разнообразнее и успешнее с точки зрения эволюции. Как только организм осваивает несколько способов познания природы, органы чувств получают возможность независимо друг от друга посылать информацию в мозг без привязки к другим раздражителям внешнего мира. Или, наоборот, какие-то чувства эволюционируют, чтобы как-то по ряду причин стать связанными. Иногда такие связи образуются из-за структурных ограничений. Если два разных чувства занимают соседние области в мозге, то связи между ними могут образоваться случайным образом. В других случаях, когда кроссmodalность чувств позволяет успешно решить проблему, может быть задействован отбор. До сих пор я подчеркивал кроссmodalность, потому что восприятие более высокого порядка невозможно без взаимодействия чувств друг с другом, даже если они являются «командой соперников». И для лучшего понимания работы восприятия необходимо обсудить кроссmodalность и ее влияние на биологию, поведение и эволюционный потенциал организмов.

Не только люди или приматы обладают уникальной способностью объединять несколько чувств. Некоторые млекопитающие собирают полученные от различных органов чувств данные в одно целое, и тогда информация воспринимается как общая, связанная с более крупным или всеобъемлющим элементом, воздействующим на чувства. Так, например, высокий звук может быть обработан в сочетании со светлыми тонами, потому что по отдельности эти два сенсорных раздражителя регулярно ассоциируются с хищником или добычей. Существуют два механизма, благодаря которым происходит именно так, и оба могут работать одновременно. Организм может делать это, во-первых, потому, что сенсорные сигналы усиливают друг друга, а во-вторых, потому, что они могут быть обработаны аналогичным обра-

зом. В первом случае различные сенсорные сигналы действуют как зубчатые передачи: если одно чувство усиливает остроту сенсорного восприятия, то и другое поступает так же и т. д. Во втором случае один смысл просто сцепляется с другим. Кроме того, благодаря исследованиям поведения животных выяснилось, что и не являющиеся приматами млекопитающие могут на самом деле формировать очень сложное восприятие информации, поступающей из окружающей среды, особенно когда в ее создании участвует другой вид (помните «я убегаю», «я ем» и «я спариваюсь»?).

Существует довольно мало работ по изучению этого феномена у не относящихся к приматам млекопитающих на уровне структуры и физиологии мозга. Тем не менее поведенческие исследования (близкие к тем психологическим подходам, что используются в изучении когнитивной биологии человека) указывают на возможность наличия кроссmodalности у многих животных. Такая кроссmodalность имеет адаптивную историю, потому что организмы, особенно занимающие видное место в экосистемах, такие как млекопитающие, имеют преимущество при отборе в том случае, если они быстро и точно обрабатывают и классифицируют объекты в окружающей среде. Чтобы этого достичь, кроссmodalности пришлось пройти долгий путь развития. Далее я приведу примеры, которые продемонстрируют правдоподобность такого хода мыслей о не относящихся к людям приматах и других млекопитающих, а также о связях, которые устанавливаются между органами чувств.

Многие примеры взяты у плотоядных, таких как кошки, собаки и тюлени, потому что они по своей природе являются социальными животными и наблюдения за ними дают богатый материал для работы. В ходе одного эксперимента ученые следили за самкой морского льва по имени Рио. Она содержалась в неволе, но была новичком, то есть ранее в исследованиях участия не принимала. Результаты нескольких тестов на совмещение показали, что Рио могла устанавливать кроссmodalные связи визуального ряда букв и воспринимаемых на слух цифр.

В тестах на совмещение используется поведенческий инструмент, который называется выработкой условного рефлекса с помощью подкрепления. При этом подходе создаются условия, в которых животное должно отвечать на определенные сигналы, и если оно все делает правильно, то получает награду. Исследователи взяли два набора визуальных стимулов, каждый из которых содержал несколько разных фигур (рис. 16.1). Сначала Рио предоставили возможность установить связь между определенными звуками и визуальными стимулами одного набора фигур и теми же самыми звуками и фигурами из другого набора. Затем ее научили классифицировать каждую из десяти фигур, то есть относить ее к определенному набору. Таким образом Рио понимала, что буква А принадлежит к первому набору, алфавиту, а 4 относится к цифрам. Условный рефлекс подкреплялся наградой, которую она получала, когда правильно указывала набор символов и определяла соответствующий звук. Рио довольно быстро и легко освоила эту систему, научившись связывать высокий звук с буквами, а низкий — с цифрами. Затем ей дали послушать шесть разных звуков, объединенных попарно: колокольчик и сирену, свайп и белый шум, вибрацию и гудок. При этом все эти звуки отличались от изначальных высоких и низких звуков. В парах один звук был высоким, а второй — низким. Затем Рио «попросили» связать цифры и буквы с новыми звуками. Рио последовательно соотнесла три из них (колокольчик, свайп и вибрацию) с буквами, а другие три (сирену, белый шум и гудок) — с цифрами. Таким образом Рио создала кроссmodalный контекст, где звуки соответствовали визуальному ряду.

Также есть предположение, что львы, еще одни плотоядные, используют кроссmodalные реакции для того, чтобы опознать других животных и человека как в дикой природе, так и в неволе. Исследователи, изучавшие это явление на примере африканских львов в дикой природе, применяли теорию нарушения ожиданий (EVT). Этот подход оценивает реакцию особи на искусственно применяемые, непредвиденные отклонения от нормальных социальных реакций. Опять же, в этом случае хорошо



Рис. 16.1. Первый (алфавит), и второй (цифры) наборы стимулов

наблюдать именно за хищниками, потому что они в целом животные социальные. В этом эксперименте подопытные львы слышат громкий рык позади экрана, где изначально изображен другой лев. Тест построен таким образом, чтобы вызвать реакцию у подопытных львов, которая указывала бы на то, что они узнали того или иного сородича. Львы узнают друг друга, ориентируясь одновременно и на внешность, и на звук. Однако ученые задались вопросом: кроссmodalна ли эта реакция? Они предположили, что если узнавание особей не включает кроссmodalные реакции, то подопытные львы будут одинаково реагировать на полностью видимого рычащего льва и на скрытый фальшивый рев. После эксперимента над несколькими львами исследователи отметили разницу в их реакции: львы странно реагировали на несогласованные звуковые сигналы и нормально реагировали на рычание, связанное с визуальным образом. Эти результаты показывают, что у львов (социальных животных) существует кроссmodalная аудиовизуальная связь для распознавания особей.

До недавнего времени кроссmodalные связи изучались на приматах, потому что тех можно вырастить в благоприятных условиях и привезти в лабораторию для проведения экспериментов. Теперь эта тенденция резко изменилась из-за этического аспекта содержания животных в неволе с целью исследования. Тем не менее макаки и шимпанзе много изучали с точки зрения кроссmodalности. В поразительном эксперименте 2011 года Вера Людвиг, Икума Адачи и Тецуру Мацузава показали, что у шимпанзе существует такая же кроссmodalная связь зрения и слуха, как

и у людей. В тестах, которые использовали ученые, шимпанзе нужно было за определенное время решить задание на опознание предмета. Шимпанзе помещают перед сенсорным экраном компьютера и стимулируют как звуками, так и зрительными образами, а затем просят ответить, коснувшись экрана в нужном месте. Эти исследования требуют длительного времени наблюдения. После многочисленных тестов с несколькими испытуемыми стало очевидно, что шимпанзе ассоциируют белый цвет с высоким тоном, а черный — с низким. Звучит знакомо? Этот результат в значительной степени совпадает с человеческой реакцией: люди (как взрослые, так и младенцы) соотносят высокий тон и светлые изображения.

Как же проходил этот эксперимент? Исследователи на короткое время показывали шимпанзе маленький белый или черный квадрат на экране компьютера. После того как белый или черный квадрат исчезал, появлялись два больших квадрата (один белый и один черный) в верхней половине экрана, и шимпанзе просили выбрать тот, что был показан ранее. Исследователи записывали, насколько быстро и точно реагировал шимпанзе, и использовали эти результаты в качестве ориентира, проводя сравнения с другими вариациями этого эксперимента. Шимпанзе обучились этому испытанию и могли проделывать его так же быстро, как и человек. Просматривая видео этих тестов, нельзя не болеть за шимпанзе: хочется, чтобы он делал задания быстрее, чем человек. Эксперимент начался, как только шимпанзе привыкли к задаче на определение черного и белого квадратов. При появлении изображения квадрата фоном звучал высокий или низкий тон, и исследователи фиксировали точность и скорость реакции шимпанзе. Если высокий звук звучал вместе с белым квадратом, шимпанзе быстрее идентифицировал квадрат как белый. И наоборот, если высокий звук звучал с черным квадратом, шимпанзе немного медлил, перед тем как определить квадрат правильно.

По результатам этих экспериментов можно утверждать, что кроссmodalность, соединяющая светлые цвета с высоким тоном, существовала у общего предка шимпанзе и людей и, возможно,

еще дальше по линии приматов. Внимание! Быть может, это панглоссианское, или довольно наивное, объяснение того, как могла развиться кроссмодальная связь светлого цвета с высоким звуком. Тем не менее этот вопрос до сих пор остается довольно интересной задачей. (Напомню, что панглоссианское объяснение¹ — это желание во всем найти адаптивную причину.) Некоторые исследователи предположили, что феномен соотношения светлых изображений с высокими тонами восходит к нашим предкам — низшим приматам. Панглоссианский аргумент основан на представлении о существовании адаптивной потребности в быстрой обработке внешней информации. Адаптивный аргумент для этой связи также зависит от трюка, который для нас исполняют зрительные системы. Это называется эффектом света, падающего сверху (рис. 16.2). Иллюстрация показывает, как восприятие освещения сверху кардинально влияет на то, что мы видим. Вогнутость или выпуклость фигуры определяется тем, откуда исходит свет или откуда мы чувствуем, что свет исходит. Люди и шимпанзе предполагают, что свет всегда приходит сверху, — отсюда и разница в восприятии выпуклости и вогнутости.

Панглоссианский аргумент состоит в следующем. Мы ассоциируем свет сверху с высокими звуками, потому что другие организмы, которые мы видим над нами, обычно имеют меньшие размеры. Например, если вы сидите на улице и хотите определить не глядя, какие живые существа находятся над вами, то вряд ли вам придет в голову назвать гиену. Скорее всего, над вами могут мельтешить птицы или белки (если вы сидите в Центральном парке в Нью-Йорке, есть шанс, что пролетит краснохвостый ястреб). Эти создания действительно меньше нас и издают тонкие, высокие звуки. И большинство организмов, обитающих над нами и издающих тонкие звуки, освещены лучше, чем организмы, которые находятся ниже. У адаптивной истории есть еще один аспект. Организму нужно понимать, дол-

¹ Панглоссианским оно называется благодаря доктору Панглоссу, герою повести Вольтера «Кандид, или Оптимизм».

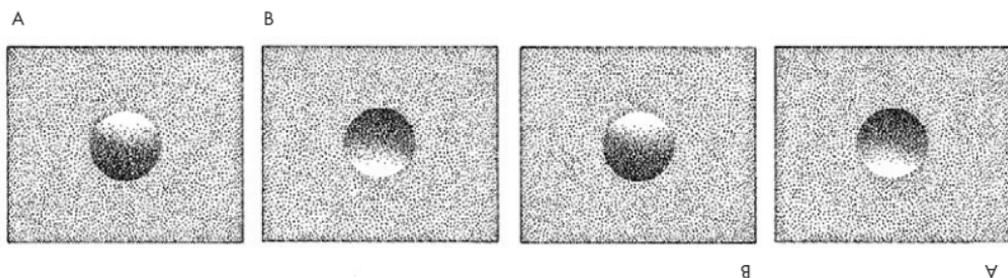


Рис. 16.2. Эффект падающего сверху света. На двух левых изображениях наша зрительная система обрабатывает картинку А как выпуклую в центре, а В — как вогнутую. Это происходит из-за присутствия эффекта падающего как будто сверху света. Справа два левых изображения перевернуты вверх ногами. То же самое изображение, что воспринималось как выпуклое (изображение А справа), теперь выглядит вогнутым (перевернутым А), и наоборот

жен ли он спастись бегством, то есть относится ли встреченное существо к категории «я от тебя убегаю», потому что выживание часто зависит от распознавания чего-то опасного и счет в таких ситуациях идет на доли секунды. Обычно организмы не убегают от существ, которые меньше их самих, и тех, кто издает высокие звуки. И наоборот, низкий звук означает нечто совершенно иное.

Мне потребовалось около пятисот слов, чтобы описать эту адаптивную историю, однако существует более простое объяснение. Чарльз Спенс и Офелия Дерой предполагают, что правильными соответствиями на самом деле являются сочетания света с размером и размера с высоким тоном. Поскольку кроссmodalные соединения являются транзитивными, то есть переходными, то, как только существо осознает соответствие размера и света или размера и звука, в сознании соединяются свет и звук. Поэтому кроссmodalная связь света и звука в мозге не является врожденной и прямой, это может быть приобретенный эффект. Этот альтернативный сценарий также предполагает, что сначала нужно изучить экологический контекст потенциальной кроссmodalности и только потом делать заявления о врожденной прямой кроссmodalности и синестезии. Панглоссианское объяснение может слишком легко нас обмануть. Но если кроссmodalность реализуется нейронными связями, можно ли найти различия

в нейронных связях в мозге среди организмов? И что же нас тогда отличает на нейронном уровне, когда линии позвоночных расходятся?

В процессе эволюции некоторые части мозга увеличиваются, а другие образуют все большее и большее количество связей с другими частями мозга. История с мозгом приматов, который понадобилось свернуть в рулончики — извилины и борозды, отлично демонстрирует, что различные части мозга становятся больше в нашей линии развития. На самом деле хорошо известно, что у общего предка *Homo erectus*, *H. neanderthalensis* и *H. sapiens* произошел огромный скачок в объеме мозга. Некоторые из наших старых предков, связанных с австралопитеками и очень ранними отошедшими от нашей ветки видами рода *Homo*, имели размеры мозга менее 704 см³ (43 кубических дюйма), а шимпанзе — 294 см³ (18 кубических дюймов). Напротив, мозг *H. neanderthalensis*, как и у *H. sapiens*, был порядка 1507 см³ (92 кубических дюйма) (при этом средний мозг неандертальца был немного больше, чем средний мозг *H. sapiens*). К сожалению, нет никакой возможности углубиться в изучение вопроса, какие нейронные связи были у наших предков с этими видами рода *Homo*. В отличие от мозга Леборна, который сохранился в формалине, и мозга Молисона, который был разрезан на тысячи тонких кусочков, у нас просто нет сохранившегося мозга или изображений мозга этих давно вымерших видов *Homo*. Однако мы располагаем информацией о нейронных связях шимпанзе, других приматов и млекопитающих. Что они могут рассказать нам о переходе в человеческое восприятие и, возможно, даже о развитии сознания в нашей линии?

Если коротко, есть только некоторые связи. А если давать более развернутый ответ, то нужно рассмотреть понятие коннектома. Это относительно новый термин в области изучения мозга, и относится он к отображению аксональных синаптических связей в мозге. Образован термин благодаря привычке современных биологов добавлять суффикс -ом- к любым подходам, которые в природе располагают большим объемом данных. Один из спо-

собою — посмотреть на клеточную структуру мозга, как в случае с мозгом Генри Молисона, описанным в главе 10. Этот подход был использован для модельных организмов, имеющих мозг, поддающийся коррекции, таких как нематоды (*C. elegans*), и он требует, чтобы мозг (или первомозг — см. главу 2) этой нематоды был разрезан на сотни очень тонких участков, которые затем последовательно просматриваются в просвечивающем электронном микроскопе. Каждая секция фотографируется с увеличением так, чтобы можно было идентифицировать все нервные клетки. Затем фотографии совмещаются с помощью системы компьютерной визуализации, и различные нервные клетки могут отслеживаться и изображаться на графике. Если провести этот опыт полностью со всем мозгом, можно обнаружить связи всех видимых нервных клеток. В превосходном исследовании, сделанном в 1986 году, ученые смогли определить, что коннектом нематоды состоит из 279 клеток. Это около одной четверти от общего числа клеток, которых в этом крошечном червеобразном организме около тысячи. Кроме того, есть четко видимых 6393 синапса, соединяющие 279 клеток с 1410 соединениями этих нервных клеток с мышцами. Тем не менее этот примитивный червь чувствует свет, тактильные ощущения, запахи и вкус. Однако нет никаких доказательств того, что нематода обладает какой-либо кроссmodalной сенсорной способностью.

Этот подход действительно настолько утомителен, каким и представляется, однако он весьма информативен. Он дает сведения о коннектомах, а другие подходы рисуют их крупномасштабную картину. Методы, используемые для более широкой демонстрации коннектомов, включают МРТ и ДТМ (см. главу 15). Объединив информацию из сотен исследований в богатую базу данных, ученые попытались построить схему сети нейронных связей. Основным аналитическим инструментом, который они используют для построения коннектомов различных организмов, служит теория графов. В принципе каждая картина нервной системы — будь то реальный вид, наблюдаемый под микроскопом, или просто информация о связности, ос-

нованная на других наблюдениях, — может быть представлена в виде графа, который затем используется для анализа и интерпретации данных.

Граф — это просто математическое описание сети связей одной области мозга с другой. Места соединения называются узлами, и результирующий граф дает обширнейшую информацию. Объединить графы из разных источников — задача нетривиальная, поэтому подходы теории графов необходимы, чтобы понять колоссальное количество данных (*big data*)¹. Теория графов подводит нас к трем очень интересным аспектам нейронных сетей: концентраторы (хабы), блоки (клубы) и сообщества. Концентратором называется узел или нейрон с высокой связностью; блок — это пучок нейронных связей более высокого порядка, чем общий фоновый уровень связей; сообщество — взаимосвязанный набор нейронов. Все три аспекта графов можно использовать, чтобы получить подробную картину связей в мозге различных организмов и вывести некоторые универсальные понятия о коннектомах.

Анализ коннектомов с применением теории графов показывает, что сообщества связей локализуются независимо от вида в определенных частях мозга. Этот паттерн означает, что кластеризация нейронов чаще всего происходит в локализованных пространственно-ограниченных областях мозга большинства млекопитающих. Некоторые связи выходят из этих сообществ, но преобладающее их количество происходит среди близких или соседних нейронов. Кроме того, сообщества могут быть связаны с определенными функциями, такими как рассмотренные ранее (см. главу 15) сенсорные области мозга. Существует также сохранение этих областей между относительно близкородственными видами, так что, например, мыши, обезьяны и люди демонстрируют некоторые

¹ В современной терминологии *Big Data* — это, грубо говоря, отрасль накопления, обработки и передачи больших массивов данных. Но при этом термин *Big Data* применяют, как правило, только в отношении цифровой трансформации общества (иногда ее еще называют четвертой технической революцией).

очень похожие лимбические и когнитивные сети. Если ветви на древе жизни расходятся — к насекомым или даже к рыбам, эти сходства либо исчезают, либо их очень трудно обнаружить.

И все это означает, что по мере развития мозга по линии приматов (и по мере его увеличения) большая масса порождала более тесно связанные сообщества нейронов, что, в свою очередь, приводило к потенциалу специализированных функций локализованных сообществ. Мартийн ван ден Хьювел, Эдвард Буллмор и Олаф Спорнс, делая обзор коннектомов, предполагают, что сильная модульность структур, наблюдаемых в коннектоме, обусловила то, что сенсорная и моторная информация локализуется в кортикальной области. Кроме того, они считают, что по мере организации этого коннектома в хабы, блоки и сообщества это также способствовало увеличению латерализации мозга и эволюции специализированных нейронных функций, таких как язык. Стоит отметить, что приобретение высших когнитивных функций, которые делают нас тем самым видом, в который мы эволюционировали, скорее всего, не было бы возможным без этих общих правил кластеризации нейронных клеточных связей в коннектоме. И что касается кроссmodalных эффектов и синестезии, о которых я говорил в главе 15, по общему правилу образования коннектомов короткие нейронные пути более предпочтительны, чем длинные, и поэтому между сообществами образовалось больше связей, что и привело к кроссmodalным эффектам.

Однако это еще не все, потому что история не заканчивается простым наблюдением сходства. Есть также различия между людьми и другими млекопитающими, особенно другими приматами. Наиболее релевантными для обсуждения являются те, которые относятся к низшим приматам — макакам, к нашим ближайшим живым родственникам — шимпанзе и собственно к нам (рис. 16.3). Удивительным результатом сравнения коннектомов этих приматов с нашими коннектомами становится то, что в итоге возникают гипотезы, касающиеся высших когнитивных и поведенческих аспектов нашей эволюционной истории.

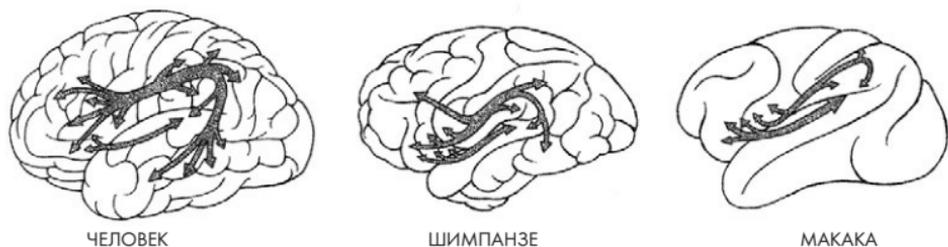


Рис. 16.3. Коннектомы человека, шимпанзе и макаки

Связи в мозге, претерпевшие эволюционные изменения, можно определить с помощью различных методов визуализации мозга, рассмотренных ранее (см. главу 15). Серое и белое вещество, две основные ткани мозга, где связи обладают решающим значением, имеют четкие различия у приматов. Белое вещество является белым по внешнему виду и состоит в основном из отростков нервных клеток, называемых аксонами, которые проходят через эту часть мозга и действуют как проводники к серому веществу. Серое вещество имеет розовато-серый цвет и организовано сложнее, чем белое, поскольку содержит другой вид отростков нервных клеток, называемых дендритами, а также концы аксонов, которые приходят из белого вещества. Концы аксонов образуют синапсы с дендритами. Серое вещество обычно находится во внешних слоях мозга, а белое вещество — ближе к внутренней части.

Пути коннектома расположены в основном в белом веществе, и действительно, именно здесь проходят наиболее важные проводящие пути нервной ткани, участвующие в более сложных связях. Диффузионно-тензорное изображение особенно хорошо показывает связи путей в белом веществе. Люди по сравнению с другими приматами и даже млекопитающими отличаются плотностью белого вещества. Это означает, что также, по всей вероятности, существуют и различия в плотности связей. В частности, в человеческом мозге более высокое соотношение белого и серого веществ, и это наиболее заметно в префронтальной коре (рис. 16.4).

Что касается связи, то исследователи определили следующее: только одна четверть заметных связей между приматами общая для

обезьян, человекообразных обезьян и людей. Есть также определенные области человеческого мозга, где расположено чрезмерное количество связей, и они коррелируют с определенными функциями мозга. Хорошими примерами являются такие области, как области Брока и Вернике, которые отвечают за уникальную человеческую способность — речь. Исследование с помощью ДТМ показывает, что связи в нескольких частях мозга приматов (в основном во внешней средней части мозга) сохраняются и у обезьян, и у человекообразных обезьян, и у людей. Но другие части префронтальной коры и нижняя теменная часть (область, расположенная чуть позади префронтальной коры) мозга демонстрируют очень интересное и более сложное отличие человека.

По мере того как низшие приматы расходились в эволюционном плане с обезьянами, а человекообразные обезьяны, в свою очередь, тоже делали это, мозг увеличивался. В более продвинутом мозге (таком, как наш) образовывалось большее количество связей. Системы зеркальных нейронов у приматов являются хорошим примером этой тенденции. Зеркальный эффект был впервые показан у макак, но это свойство проявляется также и у шимпанзе, и у людей. Методы визуализации мозга, такие как

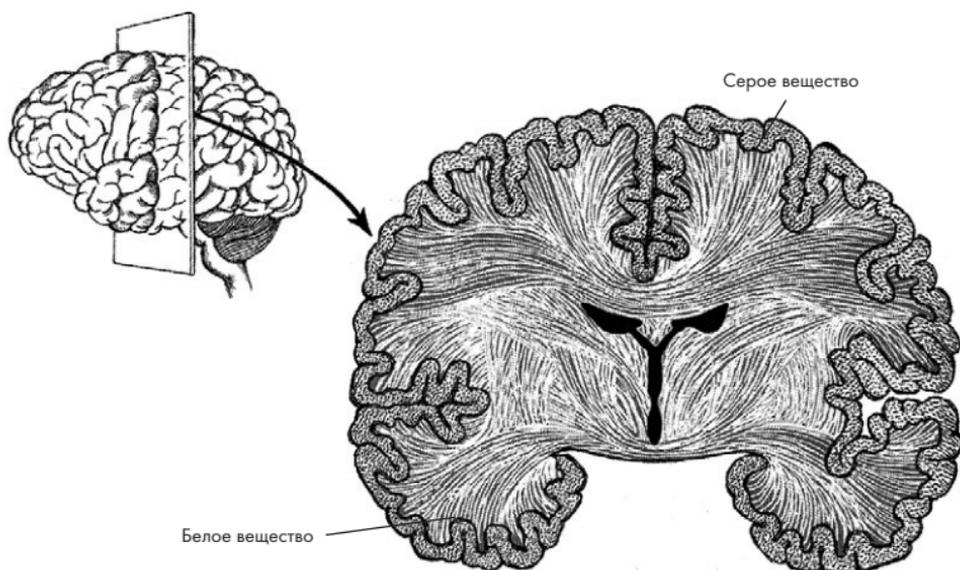


Рис. 16.4. Белое и серое вещество в поперечном сечении мозга

ДТМ, раскрывают нейронные связи зеркальной системы, и исследователи до мельчайших деталей изучили эти связи. Диффузионно-тензорная визуализация показала, что у приматов системы зеркальных нейронов имеют три уровня организации. У макак, шимпанзе и людей присутствуют зеркальные нейронные связи в лобно-височной части мозга, и они распространяются в лобно-теменной области мозга с помощью очень специфических нервных клеток. Но именно в этой области останавливается путь зеркальных нейронов у макак. У людей же и шимпанзе зеркальные связи распространяются в нижнюю височную кору. А вот там зеркальные связи шимпанзе заканчиваются, и только у людей они распространяются в верхнюю теменную кору. Эрин Хехт и ее коллеги построили модель, объясняющую эти различия, и предположили, что именно таким образом и появились «различия в зеркальных системах связности и способности реагировать (учитывая видовые различия в поведении, включая адаптацию к подражанию и социальное обучение использованию инструментов)».

Но вот еще один панглоссианский момент. По-видимому, основная цель сравнения размеров и связей мозга макаки, шимпанзе и человека заключается в объяснении огромных различий в поведении видов. Нет никаких сомнений, что именно мозг — источник той огромной разницы, которую мы видим между собой и другими видами приматов. Тем не менее мы должны быть осторожны, прислушиваясь к бездоказательным выводам доктора Панглосса о том, что эти различные связи зеркальной системы мозга привели к эволюционному скачку, подобному созданию инструмента. Впрочем, такое предположение — прекрасная гипотеза, требующая проверки.

ЛИЦА И ГАЛЛЮЦИНАЦИИ

Узнавание лиц и галлюцинации
как высшая форма восприятия

Мне не нужны наркотики. У меня
и так галлюцинации.

Томас Пинчон, писатель

Макаки отлично распознают лица, что очень важно для их социальной организации. Мои читатели, если у них нет когнитивного расстройства, называемого прозопогназией, наверняка в курсе, какое значение для представителей нашего вида имеет узнавание лиц. Есть два вида прозопогназии: травматический и врожденный. В обоих случаях страдает латеральная затылочно-височная извилина, расположенная глубоко в области височной доли и отвечающая за обработку зрительной информации. Следовательно, там и обрабатывается необходимая для распознавания лиц информация. И действительно, именно в том месте у макак могла бы находиться нейронная сеть, отвечающая за эту способность. У людей ответственная за распознавание черт лица структура находится ближе к задней части мозга (и ниже), чем у макак, и объяснить эту разницу можно, рассмотрев путь развития мозга обезьяны и человека. Четкую разницу между человеком и макакой показывает связанность ответственных за распознавание лица нейронов. Результаты исследований связанности нейронов у людей показали, что в области мозга, отвечающей за распознавание лиц, существуют два потока нейронов, выполняющих эту функцию. Данные потоки работают примерно так

же, как зрительные потоки «что» и «где», описанные в главе 13. Один из потоков распознавания лиц дорсальный, а другой вентральный, и между ними существует лишь слабая связь. У макак, как и у людей, есть дорсальный поток и множество связей внутри его, но у человека второй поток в процессе эволюции развился независимо. Поэтому результаты свидетельствуют о наличии существенной разницы в механизме распознавания лиц у макак и людей. Но как насчет шимпанзе, которые гораздо ближе к человеку, чем макаки?

Джессика Тауберт и Лиза Парр исследовали реакцию шимпанзе на лица. Чтобы понять подход исследователей, важно знать, что распознающие лица области человеческого мозга гораздо более детерминированно реагируют на лица, чем на другие предметы, такие как обувь или стулья. Все лица содержат изображение буквы «Т» (рис. 17.1). Два глаза образуют горизонтальную перекладину Т, а нос и рот — вертикальную. Согласно выводам ученых, распознавание этой Т-образной формы и есть информация первого порядка о распознавании лица. Это первый шаг, который позволяет продвинуть информацию дальше по нейронному потоку, отвечающему за распознавание лиц, в так называемые потоки второго порядка. Тауберт и Парр сначала задались вопросом: служит ли информация первого порядка (то есть определение Т-образной формы) основой реакции шимпанзе на лица? Или же эта реакция более сложна и обезьяны используют так называемые «лунные» картинки? Это изображения лиц или других предметов с максимальной контрастностью, когда остаются только черный и белый цвета и почти нет информации, которую можно трактовать как черты лица.

Тауберт и Парр создали «лунные» изображения лиц шимпанзе, человеческих рук и неодушевленных предметов, таких как обувь. Фокус в том, чтобы создать серию таких картинок с градуированными черно-белыми тонами различной контрастности. Если говорить о людях, то при оптимальном контрасте таких изображений путь второго порядка системы распознавания человеческого лица уменьшается, и единственное, что мы используем



Рис. 17.1. Т-образное лицо из фруктов и овощей на изображении картины Джузеппе Арчимбольдо справа, и оно же вверх ногами слева. Форма «Т» легко узнается на перевернутом рисунке (справа), и поэтому мы интерпретируем эту картину как человеческое лицо. Даже когда картина расположена правильно (слева), некоторые люди видят на ней лицо, потому что они распознают перевернутую «Т», а затем зрительная информация передается на обработку нейронной сети, отвечающей за распознавание лиц

для распознавания изображения, — это информация первого порядка. Информация второго порядка — это то, что мы применяем для узнавания определенных людей. Поэтому в случае высококонтрастного лица на картинке мы сможем распознать его как лицо, но не сможем узнать человека.

Шимпанзе легко определяют лица и запросто отличают их от руки или обуви. Как и люди, шимпанзе обращаются к информации первого порядка, если контрастность усиливается, и способность идентифицировать человека снижается. Результаты этих экспериментов показывают, что и шимпанзе, и человек имеют один уровень организации для распознавания лиц. Это означает, что в процессе развития у шимпанзе (так же, как у человека) был дополнительный шаг разделения двух зрительных потоков нейронов, отвечающих за распознавание. Этот вывод весьма ра-

зумен, так как у нас с шимпанзе 5–7 миллионов лет назад был общий предок. Это также означает, что у тех видов рода *Ното*, о которых мы говорили в главе 16, была, вероятно, более сложная зрительная схема распознавания лиц.

Почему распознавание лиц столь важно? Многие биологи утверждают, что эта способность — неотъемлемая часть социализированного поведения человека и других приматов. Визуальное распознавание лиц и других объектов действительно важно в адаптивном контексте. В этой дискуссии трудно отказать доктору Панглоссу в праве голоса. В главе 10 я уже говорил, что некоторые травмы головного мозга приводят к интересным девиациям в распознавании лиц. Это и синдром Капгра («я знаю, что вы похожи на мою маму, но я не реагирую на вас так, как будто вы и есть моя мама, поэтому вы наверняка самозванка»), и эффект расщепления мозга «Майк или я». Эти девиации являются хорошими примерами того, как именно происходит процесс работы с лицами. Но как насчет других объектов, которые сбивают с толку наши глаза? Возьмем нечеткую фотографию собачьей задницы, которая напоминает лицо длинноволосого бородатого мужчины — в точности, как изображают Спасителя. Шерсть на изображении, которое всего за одну неделю обошло весь интернет и набрало почти двести тысяч просмотров, действительно выглядит как тело в тунике с вытянутыми руками. Мозгу (по крайней мере моему) нужно совсем немного, чтобы увидеть на этой фотографии лик Спасителя.

Это не единственный пример явления, когда люди видят икону в странных и неподходящих местах. Зафиксированы случаи, когда лик Девы Марии люди обнаруживали на дорожных ограждениях. Около десяти лет назад поджаренный на гриле кусок хлеба с сыром, на котором виднелось изображение Богоматери, был продан с аукциона за двадцать восемь тысяч долларов. Эти видения нельзя считать веянием нашей эпохи, потому что явления Девы

Марии «наблюдали» на протяжении многих веков. Художниками создано великое множество известных (в том числе и печально известных) изображений Девы Марии. И она появляется снова и снова, все время в разных обличьях.

У этого феномена есть название — парейдолия, или зрительная иллюзия. Это специфическая форма нервного процесса, называемого апофенией. Апофения — это интерпретация мозгом случайной информации как чего-то значимого. Название «парейдолия» (*pareidolia*) происходит от греческого *para*, что означает «вместо», и *eidolon*, то есть «образ». В данном контексте это означает «ошибочный образ». Примеров парейдолии предостаточно, и это не только изображения икон. На этом явлении основана идея знаменитых тестов Роршаха. В тесте необходимо интерпретировать сделанные довольно случайным образом чернильные мазки или кляксы. Психологи делают свои выводы относительно психологического состояния человека, используя парейдолические интерпретации. Есть также слуховые версии парейдолии. Возможно, самыми известными примерами являются фраза *I buried Paul* («Я похоронил Пола»), предположительно услышанная в конце песни The Beatles *Strawberry Fields*, и некое сатанинское пение, возникающее при проигрыше задом наперед песни Led Zeppelin *Stairway to Heaven*.

И тут возникает вопрос: что сбивает с толку наши глаза и уши, заставляя нас видеть и слышать то, чего на самом деле нет? Что же такое происходит в мозге, что он позволяет себе такое? Большинство ответов связано с «несовершенством» эволюции мозга и взаимодействия клеток мозга друг с другом и с внешним миром.

Последний аспект описанного феномена заключается в том, что мозг, видимо, предпочитает давать религиозные объяснения необычным явлениям. Большинство доказательств этого весьма ненаучны, но есть и экспериментальные (хотя и спорные) доказательства. Неофициальные данные исходят из эволюционной пси-

хологии — отрасли эволюционной биологии, раньше называемой социобиологией, в которой человеческое поведение трактуется с точки зрения эволюции. Как правило, эволюционная психология объясняет зависимость человека от всего божественного тем, что религия обеспечивает социальную сплоченность общества, практикующего это вероучение, и становится эволюционным преимуществом. И да, здесь мне тоже надо бы сделать предупреждение доктору Панглоссу.

Другое предполагаемое доказательство того, что мы инстинктивно склонны давать явлениям религиозные объяснения, — это результат достаточно дурацких экспериментов с электромагнитной стимуляцией определенных областей мозга. Эти эксперименты предполагают использование так называемого «шлема Бога» — устройства, разработанного Майклом Персингером. Стимулирование мозга и последующее наблюдение за его поведением — далеко не новый подход к изучению функций мозга. Вспомните, еще нейрохирург Уайлдер Пенфилд щекотал различные области мозга пациентов во время операций, спрашивая тех, что они чувствуют (как указывалось ранее, поверхность мозга не имеет болевых рецепторов, поэтому некоторые операции на мозге выполняются у пациентов, находящихся в полном сознании и способных поддерживать диалог). Эти исследования позволили Уайлдеру составить карту областей мозга, ответственных за специфические сенсорные и моторные функции. Сенсорные и моторные гомункулы, о которых я рассказывал в главе 3, появились в результате этой важной работы.

Используя тот же принцип, но обходясь неинвазивным способом, Персингер создал шлем, способный передавать электромагнитное излучение в определенные области мозга. Электромагнитное излучение, видимо, изменяет функцию нейронов в области воздействия. Персингер надеялся продемонстрировать существование специфической области мозга, ответственной за экстатические религиозные чувства. Находясь под действием

шлема, некоторые испытуемые сообщали о легком головокружении и ощущении благополучия наряду с присутствием духовного чувства. Другие, такие как знаменитый эволюционный биолог Ричард Докинз, говорили, что вообще не чувствуют никакого влияния шлема. Несмотря на то что доказательства наличия божественной области мозга и божественного гена не подтверждены наукой, наше социальное поведение необычно для животного мира. Зависимость человека от религии и духовных практик для поддержания сплоченности общества, скорее всего, представляет собой результат быстрой культурной эволюции. Докинз считает, что «религия — это превращение непроверенного утверждения в непоколебимую истину с течением времени и с помощью институтов власти». Но реальность видений и призраков, о которых многие рассказывают после религиозного экстаза, — это уже другая история. Возможно, мы найдем ключ к разгадке в ответе Докинза на вопрос довольно ревностного религиозного прихожанина. Тот спросил, как Докинз может объяснить тот «факт», что вопрошающий во время молитвы действительно ежедневно видит религиозные образы и явления Марии и Спасителя? Докинз ответил, что не сомневается в том, что этот человек и другие, к кому приходят подобные видения, на самом деле «видят», и уж конечно верит в искренность их утверждений. Но затем добавил: «Сэр, я думаю, что у вас галлюцинации». Вспоминается еще одно упоминание образа Девы Марии в популярной культуре. В знаменитом сериале «Клан Сопрано» здравомыслящий «Поли» Галтиери на мгновение видит Деву Марию рядом с пилотом в стрип-клубе Vada Bing. В данном случае его видение было не парейдолией, а скорее мимолетной галлюцинацией, и это еще одна история о путанице мозга, заслуживающая внимания.

В книге «Галлюцинации» Оливер Сакс откровенно повествует о том, как в молодости экспериментировал с изменяющими сознание наркотиками. Он рассказывает о своем самом первом

опыте с ЛСД: вместе с другом они приняли таблетку, заказанную по почте, и под музыку Игоря Стравинского ждали, когда та подействует, надеясь услышать что-то умопомрачительное. Друзья быстро поняли, что пьеса Стравинского звучит так же, как и всегда: принятая ими доза подействовала бы разве что на кошку. В другой раз Сакс вколол себе большую дозу морфия и наблюдал за битвой при Азенкуре, развернувшейся на рукаве его халата. В его восприятии действие длилось несколько минут, тогда как на самом деле прошло двенадцать часов.

Галлюцинации могут быть вызваны наркотиками, как показывает опыт Оливера Сакса, но к ним могут привести также травмы головного мозга, мигрень или деменция. Бывают они и симптомами психических расстройств. Галлюцинации иногда случаются при шизофрении — психиатрическом заболевании широкого спектра, а также при болезни Паркинсона и других формах старческого маразма. Галлюцинации затрагивают все основные органы чувств, включая вестибулярную систему, то есть равновесие. Четыре из пяти основных чувств — зрение, слух, осязание и обоняние — принимают участие в большинстве галлюциногенных переживаний пациентов с шизофренией. Чаще всего эти люди испытывают слуховые галлюцинации, за ними следуют зрительные. Также довольно распространены у людей с шизофренией зрительно-слуховые галлюцинации. Поскольку шизофрения — расстройство широкого спектра, трудно определить, как именно она влияет на органы чувств.

Еще одна группа психических расстройств, при которых возникают галлюцинации, — это маразм, или деменция. Два расстройства — болезнь Паркинсона и деменция с тельцами Леви — сгруппированы в основную категорию, называемую деменцией с тельцами Леви. В начале XX века Фредерик Леви, еврейский невролог, родившийся в Берлине и работавший в лаборатории Алоиса Альцгеймера в Мюнхене, прежде чем сбежать из нацистской Германии и стать американским гражданином, обнаружил заметные аномалии в клетках головного мозга у пациентов, умерших от слабоумия. Это были клетки, продуцирующие дофамин

и расположенные в области мозга, называемой черным веществом. Эта область мозга представляет собой затемненную область на кончике варолиева моста — отдела ствола головного мозга. Аномальные нервные клетки выглядят совсем иначе, чем незатронутые заболеванием, если их определенным образом окрасить и рассмотреть под микроскопом. Они набухают и усеивают ткань мозга людей с определенными видами деменции. Похоже, что они заполняются альфа-синуклеином — белком, который снижает количество нейронов, продуцирующих дофамин. У людей с болезнью Альцгеймера также найдены тельца Леви, но основной локус патологии для таких пациентов находится в гиппокампе. Кроме того, тельца Леви локализованы в черном веществе, и поэтому болезнь Альцгеймера не оказывает радикального влияния на общую структуру головного мозга у людей с деменцией этого вида.

Интерпретация галлюцинаций — один из трех методов, используемых врачами для диагностики деменции с тельцами Леви. Галлюцинации, о которых рассказывают сами люди, — это один из способов узнать об их существовании. Но есть и другой, более объективный метод: использовать только что рассмотренный эффект парейдолии. В одной из версий теста испытуемым в течение минуты показывают несколько размытых природных пейзажей и просят их за это время описать как можно подробнее то, что они видят. Тестируемые должны указывать на описываемые предметы на фотографиях, но им не говорят, правильно ли они отвечают. Ответы классифицируются по трем категориям. Самый простой случай — когда испытуемый заявляет, что не может распознать изображение или какие-либо предметы. Вторая группа — точное описание картины и деталей. К третьей категории относятся любые иллюзии или неправильно идентифицированные предметы. Если выявляется потенциальный воображаемый предмет, человека спрашивают, есть ли этот предмет на картинке и похож ли он на то, что было описано. В других вариантах теста используется тот же принцип идентификации воображаемых предметов, причем степень озвученных зрительных иллюзий коррелирует с ко-

личеством воображаемых предметов, наблюдаемых испытуемым. Использование парейдолии для диагностики деменции с тельцами Леви — это хороший способ объективно идентифицировать расстройство. Также с ее помощью можно исследовать людей с данным расстройством для выявления нейрофизиологической основы галлюцинаций.

Итак, какова неврологическая основа галлюцинаций? Ранние исследования этого вопроса включали изучение людей, имевших галлюцинации, и на их опыте пытались синтезировать общую теорию. Первым шагом к выявлению причин галлюцинаций было их определение. В 30-е годы XX века и галлюцинации, и иллюзии считались частью одного и того же феномена — зрительных аномалий. И именно тогда психиатры решили отделить иллюзию от галлюцинации, что помогло лучше понять природу этого визуального опыта. В то время существовало несколько теорий о происхождении галлюцинаций. Согласно одной из них, галлюцинации — это зрительные аномалии, вызванные проблемами в передаче или интерпретации тех сигналов, которые возникли в сетчатке. Следовательно, травмы или болезни глаз и есть источник галлюцинаций. Такая «глазная» теория галлюцинаций казалась разумной, потому что пациенты с нарушениями зрения действительно галлюцинировали больше, чем люди без проблем со зрением. К тому же многие галлюцинации прекращались после того, как удавалось вылечить глазную болезнь. Но впоследствии идею о том, что расстройства глаз сами по себе вызывают галлюцинации, отвергли, и, хотя влияние состояния здоровья глаза на появление галлюцинаций не исключается, оно перестало считаться единственной причиной.

Особый вид галлюцинаций, который помог продвинуться в понимании природы этих аномальных сенсорных переживаний, возникает при синдроме Шарля Бонне, который подробно описал Оливер Сакс. Этот синдром развивается у тех, кто потерял зрение в результате преклонного возраста. Пожилые слепые люди видят яркие и сложные — обычно приятные — зрительные галлюцинации, несмотря на потерю зрения, и, более того, они

открыто признают это. Для некоторых врачей синдром Шарля Бонне стал самым ярким примером того, почему галлюцинации не нужно привязывать к проблемам зрения. Но другие все же предпочитают именно так объяснять это явление. Тем не менее синдром Шарля Бонне остался моделью для изучения происхождения галлюцинаций. А вот если кто-то найдет объяснение, которое сработает и для синдрома Шарля Бонне, он сорвет джекпот на тотализаторе толкований галлюцинаций.

Есть еще один важный аспект исследований синдрома Шарля Бонне, и именно он заставил нейробиологов, изучающих этот и другие сопровождающиеся галлюцинациями синдромы, быть очень избирательными в определении того, что называть галлюцинациями. Исследователи поняли, что, как и в случае шизофрении, галлюцинации представляют собой целый спектр явлений. Сравнение двух видов — зоопсии и лилипутовых галлюцинаций — показывает потенциал различий между галлюцинациями. При зоопсии человек видит животных, и эти галлюцинации известным способом прогрессируют. Лилипутовые галлюцинации тоже имеют четко определенные характеристики, и при них человек видит крошечных людей (о чем-то похожем говорил Сакс, описывая битву при Азенкуре на собственном рукаве).

Когда ученые анализируют разные виды галлюцинаций как отдельные явления, становится очевидно: каждый вид галлюцинаций вызван различными нейронными потоками, или комплексами. Зрительные галлюцинации — это наиболее распространенный вид, и их легко изучать, поэтому они и были объектом нескольких исследований фМРТ. Оценивались и другие типы сенсорных галлюцинаций. Например, в тестировании испытуемых с шизофренией была зафиксирована сенсорная категория (или категории) более пятисот галлюцинаторных событий. Наиболее распространенными были слуховые галлюцинации, за которыми следовали зрительно-слуховые (рис. 17.2).

Первыми, кто исследовал нейровизуализацию с этой целью, были Доминик Ффитч и Пол Аллен. Аллен и его коллеги сделали

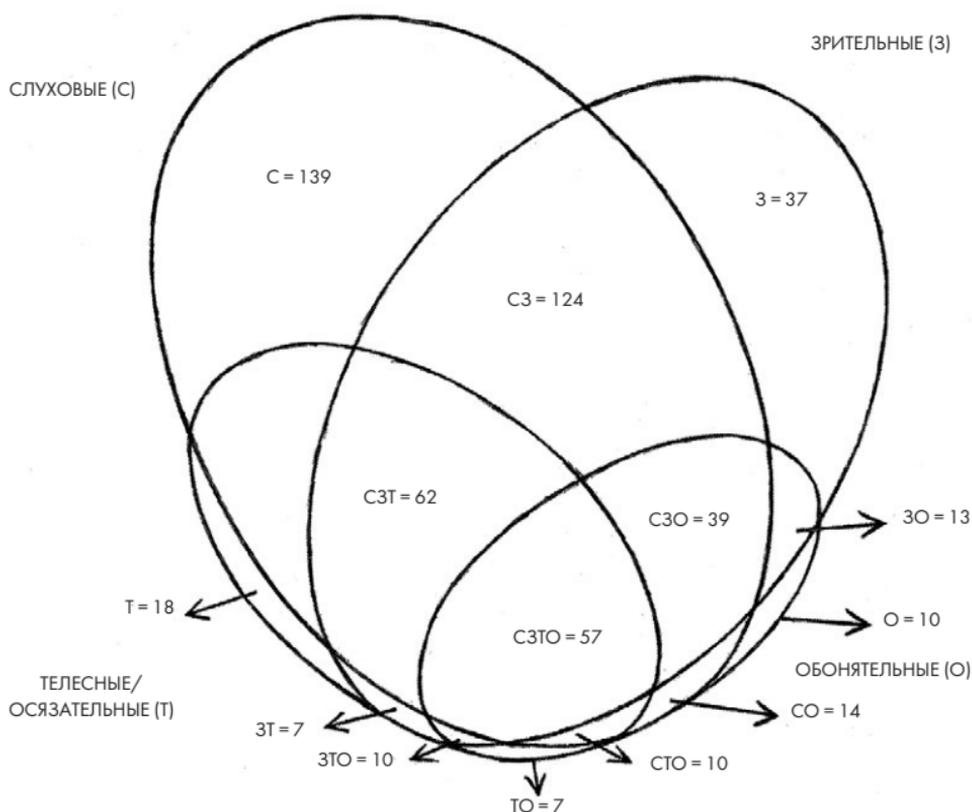


Рис. 17.2. Диаграмма Венна, демонстрирующая относительную частоту разных видов галлюцинаций и пересечение (или комбинацию) различных сенсорных галлюцинаций

обзор большого количества источников галлюцинаций и разработали модель слуховых галлюцинаций. Модель включает в себя гиперактивность областей слуховой коры, которые обрабатывают первичную информацию, поступающую в мозг через уши. Также в их исследовании прослеживается идея, что между этими первичными слуховыми корковыми областями и обработкой языка в нижней лобной коре существует измененная связь. Модель также требует, чтобы другие области мозга, ответственные за слуховую обработку, ослабили контроль над всей системой. Если предположить, что у людей с галлюцинациями связь в слуховой области нейронной системы изменена, то неизвестно, как протекает эта измененная активность и как она влияет на наше сенсорное восприятие.

Ффитч с коллегами разработали «таксономию» галлюцинационных явлений, тщательно разделяя различные виды галлюцинаций при анализе данных, полученных с помощью фМРТ. При этом подходе галлюцинирующего субъекта помещают в аппарат МРТ и просят его сообщать, когда галлюцинации начинаются и заканчиваются. Испытуемого также просят описать саму галлюцинацию, чтобы ее можно было классифицировать. Используя эти подходы, Ффитч и его коллеги установили, что связанная с галлюцинациями мозговая активность сильно локализована. При сравнении паттернов активации наблюдающих различные виды галлюцинаций людей ученые определили небольшие различия в активированных нейронах.

Зрительные пути человеческого мозга довольно хорошо изучены. Мы знаем, что цвет обрабатывается в зрительной коре, нам известно, где обрабатывается информация, используемая для идентификации лиц и даже определенных частей лица. Поэтому не секрет, что, когда у субъекта, которого исследовали с помощью фМРТ, появлялась очень яркая галлюцинация, активная область была частью зрительной коры, ответственной за цветовую интерпретацию. Удивительно, что наблюдается соответствие областей зрительной коры определенным типам галлюцинаторных образов. Другие доказательства локализованной природы галлюцинаций в головном мозге получены при сравнении людей, испытывающих слуховые и зрительные галлюцинации. Исследования фМРТ ясно показывают, что во время этих двух основных видов галлюцинаций активируются различные области мозга. Слуховые галлюцинации часто включают разговоры, и поэтому во время слухоречевых явлений активируются соответствующие области мозга — Вернике и Брока.

Все это полностью оправданно, потому что данные области мозга контролируют многие аспекты зрения, речи и понимания речи. Итак, действительно ли люди, которые галлюцинируют, слышат и видят что-то? Их паттерны активации мозга предполагают подобное, но действительно ли это зрительные образы и звук? Вспомните зеркальные нейроны: определенные части мозга, от-

ветственные за какие-то чувства, могут быть активированы, если человек просто наблюдает за тем, как кто-то что-то делает. Некоторые исследователи предполагают, что галлюцинирующие люди на самом деле считают, что звуки, которые они «слышат», поступают из внешнего мира, то есть, другими словами, неверно приписывают воображаемые голоса и звуки реальным внешним раздражителям. Если это так, то такие люди убедили себя в чем-то похожем на возможность «щекотать» собственный мозг. И действительно, Сара-Джейн Блейкмор и ее коллеги показали, что самогенерируемая тактильная стимуляция ослабляется в результате осознания того, откуда приходит стимул, поэтому нормальные люди не могут эффективно быть раздражителем для самих себя. Но, когда тестирование проходят испытывающие слуховые галлюцинации люди, у них прекрасно получается «щекотать» себя так же эффективно, как если бы это делал кто-то другой. У не подверженных галлюцинациям людей существует связь между тем, как они отслеживают и контролируют начало воздействия, и тем, как различные части тела воспринимают результаты этого воздействия. Полное нарушение или частичное изменение этой связи считается причиной той самой «щекотки», хотя точный ее механизм пока неизвестен. Люди, которые регулярно испытывают галлюцинации, не очень хорошо умеют устанавливать связь между своими действиями и сенсорной информацией, возникающей в результате их. Они также не слишком точно определяют время или соотносят действие с временными рамками, и это способствует разъединению, которое, в свою очередь, позволяет им переживать свои галлюцинации как нечто исходящее извне, а не от них самих.

Когда Оливер Сакс с другом приняли ЛСД, химическое вещество, технически известное как диэтиламид лизергиновой кислоты, попало им сначала в желудок, потом в пищеварительный тракт, а после перешло в кровь, которая транспортировала маленькую молекулу ЛСД в мозг. Соединение ЛСД структурно

очень похоже на нейромедиатор серотонин, и поэтому один из множества мозговых рецепторов, реагирующий, в частности, на серотонин, запутался из-за присутствия наркотика. Путаница, вызванная взаимодействием ЛСД с этим рецептором, привела к измененной связанности определенных областей мозга, подобно тому как это происходит у людей, которые испытывают галлюцинации при черепно-мозговых травмах и нервных расстройствах. Но доза, которую принял Сакс, была мала, и пострадала только небольшая часть рецепторов серотонина, поэтому на него наркотик не подействовал. Позже, когда Оливер Сакс принял большую дозу, влияние на химию его мозга было совершенно иным.

Прошло почти пятьдесят лет с тех пор, как Сакс впервые попробовал ЛСД, и только сейчас ученые приблизились к разгадке того, что происходит с мозгом под действием этого наркотика. В новом эксперименте, проведенном Робинот Кархарт-Харрисом и его коллегами, испытуемых обследовали с помощью трех современных технологий визуализации головного мозга, включая фМРТ. Мозг под ЛСД показывает измененную активность в таких областях, как зрительная кора. Люди под действием наркотика подробно описывают галлюцинаторный опыт, и паттерны связи до и во время небольших и экстремальных галлюцинаторных переживаний можно оценить количественно. В этом случае люди, которые «отключают» мозг, демонстрируют расширенную связь своей зрительной коры с другими областями. Что еще более важно, эти исследования показывают, что связи первичной зрительной коры с двумя областями мозга, не считающимися частью зрительного пути (парагиппокамп и ретроспленальная кора), значительно ослабевают у людей, принимающих ЛСД. По мере того как связи с этими областями становятся все менее прочными, субъекты все хуже осознают себя и теряют собственное «я». Эти результаты свидетельствуют о том, что ЛСД (как и другие источники галлюцинаций) оказы-

вает такое же воздействие на мозг, как «щекотка» самого себя, ослабляя связь со зрительными явлениями и ощущением того, откуда исходит раздражение.

Также очевидно, что в нервные процессы галлюцинирующих людей вторгаются воспоминания и эмоции. Определенное количество разных видов чрезмерной стимуляции сенсорных областей мозга, инициирующих слуховые и зрительные галлюцинации, действительно ответственны за их возникновение. Но при этом слуховые и зрительные галлюцинации усиливаются еще и внушительным вкладом других областей мозга, участвующих в кортикальной обработке более высокого уровня. В одном исследовании испытывающий зрительные галлюцинации человек был обследован на наличие необычных связей в мозге. Эксперимент показал гиперсвязанность между областью зрительной коры и миндалиной, которая встроена в лимбическую систему и активно участвует в эмоциональных реакциях. Хотя в этом исследовании участвовал только один человек, результаты наводят на мысль, что гиперсвязанность может быть фактором, направляющим или определяющим эмоциональное содержание галлюцинаций.

Хотя Оливер Сакс в течение жизни в исследовательских целях употреблял разные наркотики, он всегда заботился о том, чтобы не провоцировать на это других. Сакс был одним из самых влиятельных ученых прошлого века в области науки о мозге. Его трактат о галлюцинациях — это увлекательное путешествие в мир разума, показывающее, как галлюцинации похищают у нас чувства, чтобы создать альтернативные формы восприятия и в свою очередь альтернативные реальности. Будучи нейробиологом, Оливер Сакс отмечал корреляции галлюцинаций с нейронными структурными аномалиями у людей. Он прокомментировал это следующим образом: «Исследования и классификация галлюцинаций часто указывают на задействованные структуры и механизмы мозга и поэтому потенциально могут дать более четкое представление о его работе». Он признал важность галлюцинаций в социальном и культурном развитии человека как вида и в конечном итоге осо-

знал, насколько восприятие мира необходимо для того, чтобы мы были сознательными существами. Сакс также остро интересовался другими аспектами мозга как источниками информации, что помогло нам лучше понять особенности существования нашего вида. Они заключаются в том, как мы обрабатываем и трансформируем наши чувства (и в конечном счете — восприятие внешнего мира в целом) в слова, язык, искусство и музыку, которые обуславливают нашу уникальность на этой планете.

НОБЕЛЕВСКАЯ ПРЕМИЯ БОБА ДИЛАНА

Язык, грамотность и взаимоотношения чувств
при создании литературных произведений

Стихотворение — это голый человек..

Некоторые люди говорят, что я поэт.
Боб Дилан, музыкант и поэт

Общение с помощью символов (письменных, музыкально-звуковых, вербальных или тактильных) нельзя считать уникальной особенностью человека. Шимпанзе и гориллы используют язык жестов и символов для общения между собой и с людьми. У других животных тоже есть уникальные коммуникативные способности. Но ни один другой вид на планете, кроме *Homo sapiens*, не использует такие изоцирненные способы общения, как картинки, звуки, слова и символы. К тому же мы обладаем уникальной способностью разрабатывать генеалогию разных языков и придумывать искусственные языки просто для удовольствия. Дотракийский язык (из популярного телесериала, снятого НВО по книге «Игра престолов», рис. 18.1) и язык На'ви (из фильма Джеймса Кэмерона «Аватар») — два недавних примера этого уважаемого научного начинания. Общество создания языков поддерживает появление новых или сконструированных языков (известных как конланги — искусственные языки). Подобные языки есть даже в перечне некоторых онлайн-переводчиков: дотракийский, На'ви, клингонский, эльфийский (Квенья и Синдарин), гномий язык (Кхуздул), язык энтов и черное наречие. Такие усилия могут показаться немного экстремальными, но разработчики вы-

мышленных языков открывают новые пути для изучения функционирования нашего мозга. Как бы сказали на дотракийском: «Аттирари несолат лех, шафка несат рхаешесер» (*Atthirar nesolat lekh, shafka nesat rhaesheser*), что в моем вольном переводе означает: «Если вы изучаете язык, вы познаете мир».

Только подумайте: более трех веков люди пытаются понять, как связаны языки друг с другом. Современные языки «выросли» из старых, поэтому присущие им определенные наследственные черты позволяют лингвистам воссоздать картину того, как они развивались. Вероятно, вам интересно, сколько всего существует языков или сколько всего их было? На первый вопрос можно ответить, изучив труды антропологов и лингвистов. На сегодняшний день население планеты говорит почти на семи тысячах разных языков, однако больше половины из них, скорее всего, выйдут из обращения в ближайшие двадцать лет.

В качестве ответа на второй вопрос ниже приведены простые расчеты, сделанные буквально на коленке, и очень грубая оценка общего количества языков, которые когда-либо существовали. В результате глобализации темпы исчезновения языков в ближайшее двадцатилетие будут намного выше, чем в прошлом, но до начала этого столетия умирало (с высокой степенью точности) до двух языков в год. Если считать, что языки существуют по крайней мере десять тысяч лет, то на этой планете было около двадцати тысяч языков, причем 90% из них — это мертвые сейчас языки. При таких темпах к 2100 году останется менее 1% языков от общего количества существовавших на планете. Другими словами, 99% всех языков Земли исчезнут к концу этого столетия, а их количество никак не будет пополняться, разве что благодаря нескольким искусственным языкам. Но все не так уж и плохо: вымирание языков идет медленнее, чем вымирание видов (исчезло 99,9% всех видов, которые жили на Земле), а ведь жизнь на нашей планете существует уже несколько миллиардов лет.

Связь языков можно определить, используя различные элементы, такие как синтаксис и словарный запас. Так, например,

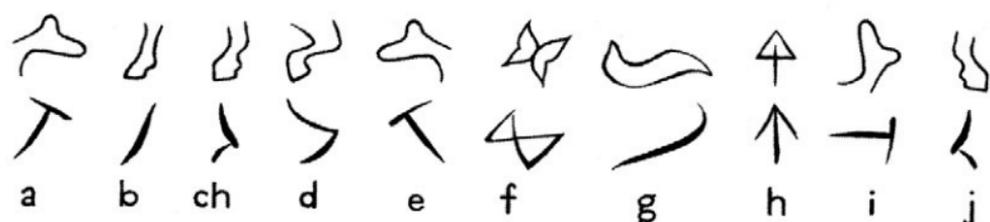


Рис. 18.1. Фрагмент вымышленного дотракийского алфавита

испанский и итальянский тесно связаны, потому что у них очень много общих элементов лексики и синтаксиса. Однако оба они сильно отличаются от тонганского, который, в свою очередь, похож на самоанский больше, чем любой из языков средиземноморских стран — итальянский или испанский. Используя этот основной принцип, люди препарировали язык, чтобы сделать со словами удивительную вещь — понять генезис разнообразия способов человеческого общения.

Описание нюансов лингвистики и особенностей языка — задача непростая, она выходит далеко за рамки этой книги. Моя цель — показать, что язык связан с чувствами (это легко), и объяснить, что наша способность использовать язык, писать музыку и создавать произведения искусства — это уникальная для животного мира особенность мозга (это будет немного сложнее), а также продемонстрировать, как эти способности соединяют нас с миром посредством разума (вот это намного, намного сложнее). Органы чувств, участвующие в обработке речи, — это в первую очередь слух и зрение. Осязание используется для «чтения» шрифтом Брайля и другими средствами передачи слов с помощью прикосновения. Например, некоторые традиционные языки, изобретенные представителями сообщества создателей искусственных языков, включают в себя держание за руки и общение посредством пожатий и хватаний. И в конечном счете я не удивлюсь, если рано или поздно возникнет общество по созданию языка, где средством передачи информации будет запах. Да и почему бы и нет, коль есть немало уникальных запахов, которые мы, люди, можем распозна-

вать, а значит, они могут нас обеспечить достаточно большим словарным запасом.

В мире много споров о том, как и когда возник язык наших предков, а также язык наших ближайших родственников — *Homo neanderthalensis*. Проблема в том, что язык нельзя наблюдать непосредственно по ископаемым находкам. Вместо этого у нас есть четыре косвенных подхода к пониманию происхождения языка. Во-первых, можно исследовать в ископаемых останках те анатомические структуры, которые отвечают за воспроизведение речи, такие как гортань или (если углубляться в детали) подъязычная кость, и их расположение в существующих скелетах сохранившихся видов или в реконструированных скелетах вымерших видов. Во-вторых, можно исследовать артефакты, такие как каменные орудия и другие хорошо сохранившиеся предметы, которые могут иметь отношение к языку. Идея здесь заключается в том, что если археологический артефакт подразумевает формирование рассуждений путем манипулирования символами и общение через такое рассуждение, то более чем вероятно, что для создания подобного предмета использовался язык. В-третьих, можно сделать некоторые выводы о происхождении языка, посмотрев на языковые паттерны у *H. sapiens* и увидев, как они соотносятся с коммуникацией у шимпанзе. Этот подход может точно определить развитие разных видов сапиенсов, но не может безнаказанно утверждать, что они являются уникальными представителями, за исключением неандертальцев или других видов рода *Homo*. Наконец, можно взять некую информацию у живых видов (например, данные на уровне генома, которые, как было показано, участвуют в понимании речи или языка) и использовать ее для интерпретации прошлых событий в эволюции языка.

Давайте сначала посмотрим на археологические свидетельства. Наиболее убедительными археологическими доказательствами были бы некоторые формы сохранившегося письма, такие как иероглифы Древнего Египта. Но такого рода свидетельств не существует ни для архаичных сапиенсов, ни для неандертальцев. Другой способ сделать вывод о существовании языка на основе

археологических данных заключается в том, чтобы найти доказательства типов мыслительных процессов, используемых при конструировании языка. Поскольку символическое мышление является главным компонентом языка, археологи специально искали подтверждение этого аспекта человеческого разума. Хотя использование символического мышления довольно легко обнаружить в наших современных объектах, таких как искусство и музыка, очень трудно установить, как именно архаичный человек или неандерталец могли бы его выразить. Ритуальные объекты, такие как цветные раковины в ожерельях и захоронения по определенным правилам, были найдены при археологических раскопках как у неандертальцев, так и у сапиенсов. Эти предметы наводят на мысль о символическом мышлении. Возможно, самой интересной (и что более важно — самой древней) археологической находкой, которую можно связать с символическим мышлением, является небольшой камень с четкими, намеренно сделанными рисунками. Артефакту, найденному в архаичном месте обитания сапиенсов, в пещере Бломбос в Южной Африке (рис. 18.2), около ста тысяч лет, и он считается первым убедительным доказательством использования символического мышления в человеческом общении. Впрочем, в археологических записях содержатся довольно скудные свидетельства того, что неандертальцы могли говорить и что у них был развит язык. Однако это не означает, что у них не было языка жестов или какой-то другой формы очень простого языка и что они не использовали символическое мыш-

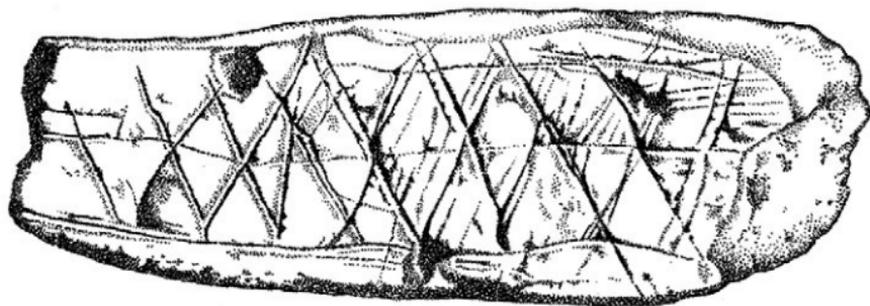


Рис. 18.2. Камень из пещеры Бломбос

ление. И можно утверждать, что археологические данные о языке сапиенсов тоже недостаточны.

Все рассуждения о происхождении языка на анатомическом уровне имеют отношение к аппарату, который сапиенс использует для создания звуков, становящихся речью и реализующихся в язык. Набор инструментов касается расположения гортани в области шеи в опорно-двигательной системе особи. В частности, гортань у людей опустилась в более низкое положение, в отличие от более высокого положения у предков — шимпанзе и неандертальцев. Есть недавние свидетельства того, что по крайней мере у одного скелета неандертальца с Ближнего Востока гортань была опущена, и на основании этого можно предположить, что та особь могла издавать речевые звуки, похожие на наши. У анатомически современного *Homo sapiens* морфологические структуры для рабочего голосового аппарата развивались уже после того, как около 200 тысяч лет назад наш вид отделился от общего предка неандертальцев и гомо сапиенсов.

Другой подход, ориентированный на анатомические структуры, включает реконструкцию мозга вымерших особей. Можно исследовать участки мозга, участвующие в воспроизведении речи и понимании языка, а потом приблизительно соотнести их с устройством современного человеческого мозга и участками, отвечающими за эти функции. Из результатов сравнения можно сделать некоторые выводы о существовании языка у древних людей. Так, например, если бы мы использовали полностью развитые и связанные области мозга Брока и Вернике в качестве ориентиров для речи и языка, то логическим подходом к определению того, говорили ли неандертальцы (по крайней мере так, как это делают сегодня представители сапиенсов), было бы изучение у них именно этих структур. Если бы мы могли реконструировать мозг неандертальца точно так же, как Мишель Тибо де Шоттен с коллегами воссоздали устройство мозга Финеаса Гейджа по изображениям его черепа (см. главу 10), то у нас был бы ответ. Проблема в том, что реконструкция структуры мозга Гейджа заставила исследователей предположить, что устройство

его нейронных связей было похоже на эталонный человеческий мозг. Это допущение отрицало бы постановку тех самых вопросов, которые хотелось бы знать об областях мозга неандертальца, участвовавших в воспроизводстве речи, поэтому к проблеме нельзя подойти таким образом. И, поскольку единственный инструмент, которым обладают исследователи для реконструкции мозга ископаемых видов, — это эндокранные слепки, примерно воссоздающие поверхность мозга, палеоантропологам еще только предстоит реконструировать мозг неандертальца. Следовательно, нет никакого способа увидеть, что собой представляли области Брока и Вернике у этого вида или у любого другого окаменелого архаичного человека.

При этом можно использовать размер и форму мозга с эндокранов и сделать выводы о развитии или строении мозга. Существует новое свидетельство того, что на ранних критических этапах когнитивного развития мозг неандертальцев и сапиенсов развивался по-разному. Доказательства получены по результатам сравнения черепов младенцев-неандертальцев с черепами младенцев сапиенсов и шимпанзе. Более ранние исследования продемонстрировали, что мозг шимпанзе и сапиенса начинает развиваться сходным образом только после первого года жизни, но не ранее. Информация о развитии мозга неандертальцев была получена при воссоздании мозга их младенцев. Исходя из этих результатов, ученые сделали вывод, что именно первый год развития у людей наиболее результативно сказывается на когнитивных различиях шимпанзе, неандертальцев и сапиенсов.

Филипп Гюнц, Саймон Нойбауэр и их коллеги смогли реконструировать череп новорожденного неандертальца, чтобы изучить динамику структуры развивающейся черепной коробки, и это позволило сделать выводы о форме мозга, который находился в этом крошечном черепе. Новорожденные неандертальцы и сапиенсы имели при рождении удлинённые черепные коробки. То, что происходит у обоих видов после рождения, существенно различается, хотя есть и общая черта — у обоих видов мозг вырастает больше, чем у других представителей рода *Homo*. У детей *Homo sapiens* в первый,

самый важный год жизни мозг становится более округлой формы, в то время как у неандертальцев он сохраняет вытянутую форму. Это означает, что мозг сапиенсов развивается и растет совсем не так, как мозг неандертальца, и, что более важно, различия в росте возникают в тот период развития мозга, который имеет решающее значение для формирования когнитивных способностей.

Первый год жизни необходим для образования обширных связей в развивающемся мозге, и эти связи являются ключевыми в познании, поведении и общении. Позже, в процессе развития, они упрощаются, но количество образованных в первый год жизни связей имеет решающее значение. Так как дальше мозг шимпанзе, неандертальца и сапиенса развивается одинаково, скорее всего, подобный этап развития после первого года существовал у общего предка всех трех видов. Это также означает, что именно в нашей ветке проявилось нечто — новое или вторичное, и это проявление и стало тем фактором, который обусловил округление мозга в первый год развития. Похоже, что у неандертальцев не было тех нейронных связей, которые в результате эволюции развились у сапиенсов для познания и коммуникации, свойственных нашему виду. Есть предположение, что неандертальцы сильно отличались от нас тем, как они смотрели на мир и как обменивались информацией о нем. Эти исследования также показывают, что для возникновения языка необходимо не только анатомическое изменение структуры нашего голосового аппарата, но и соответствующая модификация нейронных связей, которая расширяет или по крайней мере меняет когнитивные способности нашего вида. Это изменение в структуре связей мозга включает в себя возможность эффективнее воспринимать и обрабатывать звук, когда мы слышим речь.

Исследователи секвенировали геномы нескольких вымерших неандертальцев и их близкого родственника, известного как денисовский человек. Ориентируясь на данные генома, ученые определили, были ли у неандертальцев генетические компоненты для языка. Примерно таким же образом было исследовано и цветное зрение у неандертальцев (см. главу 9). У геномного подхода

есть две основные проблемы. Во-первых, вполне возможно, что язык — сложное генетическое явление (хотя у сапиенса и существует генетическая основа для языка). А во-вторых, в настоящее время у нас просто нет фактических генетических локусов, которые могут быть вовлечены в процесс, за исключением пары интересных, но слишком общих генетических феноменов. Фенотипическая сложность такого признака, как язык, становится серьезным препятствием на пути к пониманию его генетической основы. Мы уже обсуждали на страницах этой книги, как эта проблема проявляется относительно синестезических черт и шизофрении. Подобные признаки трудно определить с точки зрения фенотипа (даже с помощью хитрых тестов), и поэтому без хорошо продуманного представления о том, что это за черта, генетический анализ практически невозможен. Кроме того, даже если можно было бы определить фенотип, все же остается вероятность, что эта черта может быть вызвана сотнями генов и все они при этом немного отличаются. Исследователи обращаются к уникальным случаям из общей популяции, в которой встречается данный фенотип, и сосредоточиваются на семьях, где существует необычная его разновидность. Таким образом был изучен один «языковой» ген — FoxP2, который был обнаружен в семье, члены которой не понимали язык. Генетическая основа этого признака была подробно изучена, и, как выяснилось при сканировании генома, этот ген присутствует у неандертальцев. Детальный анализ последовательности гена FoxP2 показывает, что неандертальская версия гена и ген сапиенса идентичны на уровне последовательности ДНК. Это, однако, в лучшем случае косвенное доказательство того, говорили ли неандертальцы.

Анализ языка как феномена и его последующий эволюционный анализ были в центре внимания работы Йохана Болхуиса и его коллег. Они утверждают, что сам язык — это еще не все, что необходимо для общения. Указывая на то, что язык не может быть приравнен к общению (хотя и является его формой), они приходят к более точному определению, что же такое язык. Следовательно, эти ученые смогли взглянуть на феноменологию язы-

ка более точным и продуктивным образом. Язык для них — это способность объединять идеи и слова.

Язык не может существовать без явления, называемого слиянием. Слияние в его самой простой форме — это способность распознавать объекты и действия как исходящие от себя или от других, а также способность понять это и, что более важно, выразить это в символах. Вы сможете общаться и без этого, но вот языка у вас не будет. Понятно, что среди живущих видов слияние является уникальной характеристикой сапиенсов, потому что у шимпанзе оно отсутствует. Болхуис и его коллеги также утверждают, что способность к слиянию возникла у *Homo sapiens* примерно от 70 тысяч до 100 тысяч лет тому назад. И хотя есть мнение, что это слишком короткий период и в том, как он был установлен, не просматривается никакой логики, это время действительно имеет смысл, поскольку совпадает с распространением нашего вида по всему земному шару и нашим появлением в качестве доминирующей силы на этой планете.

Чтобы сделать обсуждение относительно полным, рассмотрим два аспекта языка — чтение и письмо. Грамотность — признак современного развития нашего вида. Вероятнее всего, письмо и чтение появились в последние 10 тысяч лет. Этот короткий период владения данными навыками оказал огромное влияние на нейробиологию наших чувств. Нейронная информация, необходимая для письма и чтения, поступает через сетчатку и, следовательно, через глаза. Конечно, читать могут и слепые, используя шрифт Брайля, но тактильные нейронные пути, по которым информация идет, когда человек читает такие книги, весьма отличаются от пути, необходимого для визуального чтения. Чтобы понять, как появилось чтение, нужен сравнительный подход. То, как люди учатся читать, можно проследить на примере детей. Чаще всего в качестве инструмента выбирают фМРТ, сравнивая продольные изображения мозга детей, обучающихся грамоте, в разном возрасте.

Как и в случае с любым сравнительным подходом, исследование нужно проводить осторожно, поскольку, если не учитывать возраст и уровень образования испытуемых, могут появиться

ошибочные выводы. Детей определенного возраста нельзя напрямую сравнивать из-за возможных различий в школьном образовании, поэтому возраст нельзя считать отправной точкой для проведения сравнения. Сравнить детей все равно что сравнивать яблоки с апельсинами, они абсолютно разные. Казалось бы, лучше всего сравнить тех взрослых, которые научились читать и писать на более поздних этапах жизни, с теми, кто еще не научился, и таким способом понять, как чтение влияет на мозг. Учитывая это пояснение о противоречивости результатов, ученые сделали очень интересные выводы о приобретении грамотности.

Как и в случае со всеми чувствами, когда исходные данные поступают в мозг через орган сбора информации (для навыков чтения и письма это сетчатка), при обучении грамотности происходит первичная быстрая обработка информации (рис. 18.3). Существуют небольшие различия между объектами в письме и чтении, поэтому мозг подавляет способность смешивать изображения, кажущиеся одинаковыми на первый взгляд, и начинает довольно четко различать явно повторяющиеся изображения. Если сравнить результаты исследования фМРТ грамотных и неграмотных взрослых, видно, что это подавление более заметно у тех, кто уже освоил грамоту. Эти сравнения также выявили более четкое разрешение визуальных путей нашего вида и различия между непохожими в культурном отношении системами письменности. Не забывайте, что информация из сетчатки на ранней стадии визуальной обработки проходит через несколько областей зрительной коры, в частности через пути, известные как V1, V2, V3 и V4. Мозг европейца во время письма использует пути V1 и V2 для определения и распознавания символов, необходимых для этого навыка. Однако те, кто пишет на китайском, распознает символы, задействуя пути V3 и V4. Очевидная причина этого различия заключается в том, что западная письменность требует знания довольно маленького числа компонентов алфавита. На английском языке это число составляет всего двадцать шесть бит информации, и столь небольшое количество единиц

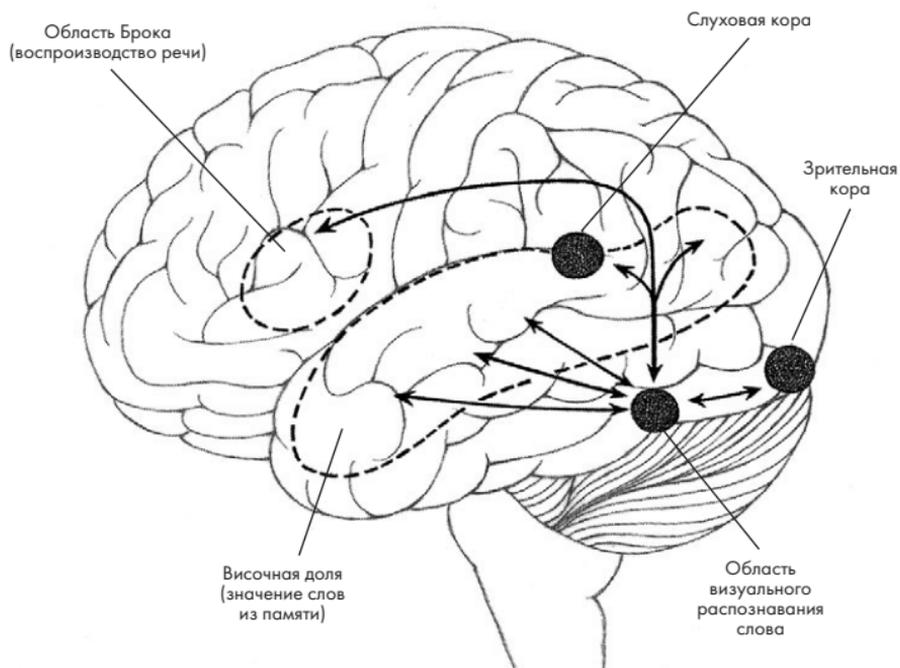


Рис. 18.3. Расположение определенных участков мозга, задействованных при письме и чтении

лучше всего обрабатывается V1 и V2. В китайском языке существуют тысячи иероглифов, которые лучше всего обрабатываются визуальными путями, распознающими формы V3 и V4. Кроме того, информация передается и в другие части мозга.

Нашим предкам было необходимо обрабатывать эту информацию и распознавать объекты внешнего мира, имеющие отношение к выживанию. Конечно, у предков-приматов не было письменности, поэтому визуальная информация, полученная от текста, оказывает уникальное и важное влияние на наш вид в отношении вентрального зрительного пути («что»). Существует четко определенная и повторяемая область вентрального пути обработки, чью активность фиксирует фМРТ, когда грамотному человеку показывают письменный источник в знакомой системе письменности, будь то Шекспир или тарабарщина. Эта область одинакова независимо от языка и его символов и называется областью визуальной формы слова. (Опять же, этот вывод сделан путем сравнения грамотных и неграмотных людей.) Похоже, что эта область мозга

сильно активизируется при восприятии письменности и даже обретении грамотности на самом элементарном уровне.

Одним из наиболее интересных моментов развития, связанных с приобретением навыков чтения и письма при использовании визуальной формы слова, заключается в том, что этот путь в мозге учится подавлять тенденцию к объединению зеркальных изображений объектов. Эта тенденция считается адаптивной, поэтому подавлять ее трудно. Допустим, вы видите гиену, чья голова повернута влево, — свойства этого хищника ровно те же, что и у гиены, которая смотрит вправо, поэтому вам нет необходимости проводить это различие, разумнее спастись от нее (и вообще от опасности) независимо от ее зеркального отображения. С приобретением грамотности появляются небольшие различия, касающиеся используемых символов. Если взять западный алфавит, то в качестве примеров можно назвать b/d и p/q ¹. И следовательно, чтобы стать грамотным, нужно справиться со стремлением к так называемой зеркальной инвариантности наших неграмотных предков. Такое изменение зеркальной инвариантности — лишь один из примеров тенденции нашего вида перемонтировать или переназначить части зрительных путей во время приобретения грамотности для того, чтобы приспособиться к уникальной видовой способности — читать и писать. Как отмечалось ранее, наш вид совсем недавно научился делать это. Станислас Дехен и его коллеги изящно отметили, что «приобретение грамотности является замечательным примером того, как мозг реорганизуется, чтобы приспособиться к новым культурным навыкам». Неудивительно, если другие области нашего мозга уже начали перепрофилировать нейронные связи, чтобы приспособиться к другим, более современным культурным явлениям, таким как взаимодействие с компьютерами и просмотр фильмов и телепередач.

Представители рода человеческого очень по-разному используют язык. Многие способы его применения сыграли непосред-

¹ Русскоговорящие дети, учась писать, часто пишут не в ту сторону элементы букв Б, Я, Р и др.

ственную роль в выживании нашего вида. По сути, некоторые палеоантропологи рассматривают язык как своего рода толчок, заставивший человека отделиться от всех других видов на планете. Пока я писал эту книгу, произошло два довольно странных на мой вкус события: бейсбольный клуб «Чикаго Кабс» выиграл Мировую серию, а Боб Дилан был удостоен Нобелевской премии по литературе. Одно из этих событий принесло мне большую радость, а другое вызвало недоумение, но в то же время заинтриговало. Являясь болельщиком сам, а также будучи сыном, внуком, братом и дядей фанатов «Чикаго Кабс», я прекрасно знаю, что значит болеть за слабого. А тот факт, что Боб Дилан, будучи безусловно слабым в литературе (если говорить о завоевании Нобелевской премии), менее чем через месяц после великолепной победы «Кабс» был объявлен лауреатом по литературе, явил нам звездный час слабаков. Многие были уверены, что Нобелевку Дилану присудили с натяжкой, и в результате возникло некое недоумение: что же тогда на самом деле считать поэзией и литературой? По крайней мере некоторые начали задаваться вопросом: действительно ли тексты Дилана являются литературой?

Почему поэзия влияет на нас не так, как случайно выбранные слова или даже специально выбранные слова, не сложенные в стихотворение? Мы сможем ответить на этот вопрос, если разберемся в нейробиологии наших чувств и в тех механизмах, посредством которых язык может вызывать воспоминания и эмоции, так же как это делают музыка и искусство. Писатель Джона Лерер, в прошлом журналист, иронично предполагает, что великий романист Марсель Пруст был нейробиологом. Он аргументирует это ссылками на то, насколько эффективно сочинения Пруста (прежде всего обсуждаемая в главе 6 этой книги история с «мадленками») возбуждают эмоции и воспоминания о прошлом. Как ни посмотри, если мы успешны в общении, используем язык, искусство или музыку, мы тоже нейробиологи. У всех нас есть свои «мадленки», и, что более важно, когда мы пользуемся речью, просматриваем произведения искусства или слушаем музыку, мы можем применить язык для описания работы мозга.

ЛИЦОМ К ЛИЦУ С МУЗЫКОЙ

Нейробиология музыки и живописи

Движение звуков — это мелодия...
Действие звуков, воспитывающее и ве-
дущее душу к добродетели...¹

ПЛАТОН

Фрэнк Заппа утверждал, что «говорить о музыке все равно что танцевать архитектуру». Рискуя все-таки нарушить его предписание, рассмотрю чувства в контексте музыки с нескольких точек зрения. Что же такое музыка и можно ли ее назвать формой языка? Как получилось, что именно представители нашего вида стали сочинять музыку? Ведь нечто похожее на музыку есть и у других видов — взять хотя бы птичье пение или голосовые сигналы китов. Для того чтобы ответить на этот вопрос, нужно рассмотреть нейронную и генетическую основу музыки у человека и понять, откуда она берется и как влияет на нервную систему. Кроме того, нелишним будет выяснить, каковы нейропсихологические основы эффекта, оказываемого музыкой, и какие чувства участвуют в ее восприятии?

Отчасти мы тянемся к музыке и воспринимаем ее органами чувств потому, что это в целом привлекательно для мозга. О музыке говорили по-разному: Стивен Пинкер назвал ее «чизкейком для слуха»², а Вольтер считал, что «то, что глупо говорить, следует

¹ Перевод В. Н. Карпова.

² Стивен Пинкер имел в виду, что это побочный продукт эволюции, не нужный никому, а не то, что это что-то сладкое и приятное.

петь». Очень важно понять отношения музыки с мозгом и нервной системой, чтобы узнать, каким образом чувства задействованы в создании уникального восприятия музыки и как это влияет на наш внутренний мир эмоций и памяти. Основная сенсорная система, воспринимающая музыку, — это слух. Но некоторые люди могут «читать» музыку и при этом «слышать» ее. К сожалению, я скорее просто любитель, хотя в молодости и научился «читать» музыку. Я понимаю, что означают ноты, но это все, на что я способен. Когда играет музыка, я слышу ее в своем сознании, но способность прочесть ноты в этот момент никак не влияет на то, что я могу «слышать». Часто ко мне привязывается какая-нибудь мелодия. Пока я писал эту главу, в голове постоянно крутилась песня Рэнди Ньюмана *You've Got a Friend in Me* («Я — твой друг») из мультфильма «История игрушек», который мы любим смотреть с трехлетним сыном. Самое смешное, что это просто строка из названия, которая никак не выходит у меня из головы. Шесть простых нот, связанных с шестью слогами, не давали мне покоя всю прошлую неделю. Я знаю, что в конце концов избавлюсь от привязчивой песенки, но одновременно надеюсь, что она не забудется совсем. Большинство таких мелодий в лучшем случае раздражают, а в худшем — отвлекают и выводят из себя. Их трудно выбросить из головы, и именно поэтому Оливер Сакс называет их «мозговыми червями». Я испытываю к этой конкретной песенке сильную эмоциональную привязанность: мультфильм «История игрушек» я смотрел со всеми тремя детьми, и мелодия из него — это нить, связывающая меня с ними, она уже стала частью моей памяти. Любая кинолента надоеет, если посмотреть ее девяносто раз, но конкретно этот фильм и привязчивая песенка из него стали своего рода «мадленками» для моего слуха.

Определить, что такое музыка и музыкальные способности, довольно сложно. Это подтверждают ученые, столкнувшиеся с трудностями при попытке разгадать генетическую основу музыки. Для того чтобы распутать сложный признак, необходимо понимать его определение. Генетики попытались «препарировать» музыку, разобрать ее на компоненты, чтобы разобраться с происхождением

этой замысловатой черты. Чтобы понять составляющие музыки, вспомните, что музыка, которую мы слышим, — это звук (об этом мы говорили в главах 5 и 7), а звуки — это по сути волны, вызывающие вибрации. Уши постоянно подвергаются воздействию огромного количества звуков. Так что же такое есть в музыке, что делает нас способными слышать ее и осознавать, что это именно она? Нет ни одной характеристики, которая делает музыку музыкой. Скорее это комбинация характеристик производимых вибраций, которые мы улавливаем ушами. Оказывается, существует от пяти до восьми основных элементов музыки (количество зависит от того, с кем вы об этом говорите), и некоторые из них необходимы для понимания генетической основы музыкальных характеристик. Характеристика, о которой говорят все, — это высота. Мы уже обсуждали высоту тона как основную характеристику звука, зависящую от частоты, с которой вибрируют предметы, и размеров этих самых вибрирующих предметов. Так, например, чем быстрее вибрация и чем меньше предмет, тем выше будет высота тона. Высота тона варьируется от низкого до высокого и измеряется в герцах. Иногда путают высоту и частоту вибрации, и это означает, что понятие высоты по сути субъективно. Диапазон слышимости здорового молодого человека составляет от 20 до 20 000 Герц, но не все звуки в этом диапазоне считаются музыкальными. Например, диапазон высоты тона на фортепиано составляет от 4,37 Герца (нота В8¹) до 2 109,89 Герца (нота С0). Люди с абсолютным слухом способны слышать звук и назвать его, не имея при этом никакой системы отсчета. Таких людей легко определить, и большинство людей с абсолютным слухом — музыканты, научившиеся этому.

Исследователи, используя методы визуализации мозга, сравнили мозг музыкантов с абсолютным слухом и без него. Оказывается, есть определенная часть мозга, называемая *planum*

¹ Для 88-клавишного рояля крайние ноты — это нота ля субконтроктавы (В0) 27,5 Гц и нота до пятой октавы (С5) 4186,0 Гц соответственно. — *Прим. науч. ред.*

temporale, которая связана с этой способностью. Поскольку эта область есть в обоих полушариях, возникает первый важный вопрос: различаются ли две стороны мозга? На изображениях четко видно асимметрию левого и правого *planum temporale* у людей с абсолютным слухом. Тогда возникает следующий вопрос: как возникает эта асимметрия? Исследования фМРТ показывают, что у людей с абсолютным слухом в детстве происходит сокращение нейронных связей в правой *planum temporale*, что делает ее меньше левой. Поскольку сокращение происходит в раннем детстве, а следовательно, и до начала обучения музыке, нельзя сказать, что музыкальное образование как-то влияет на это. Скорее всего, это явление развития, контролируемое генами. Давайте посмотрим, как работает визуализация мозга по отношению к музыке и что мы можем из этого узнать.

В качестве показателя изменения морфологии мозга используется толщина коры головного мозга: она зависит от количества белого вещества, и, следовательно, чем больше белого вещества, тем больше нейронных связей. Исследования показывают, что у людей с абсолютным слухом кора толще, однако только недавно стала понятна точная природа различий. Люди, обладающие абсолютным слухом, имеют более сильные нейронные связи в соответствующих частях мозга. В частности, левая область *planum temporale* у них кажется асимметрично больше. Эксперименты, где отслеживается подобная корреляция, проводятся очень осторожно, и участвуют в них только музыканты-правши (не забывайте, что доминирование одной из рук влияет на ту сторону мозга, где находятся определенные нейронные функции). Но существует ли эта асимметрия у людей с абсолютным слухом потому, что левая область *planum temporale* стала больше, или потому, что правая — меньше?

Генетическую основу абсолютного слуха (см. вставку 19.1) исследовали с помощью нескольких подходов. Испытанный подход с исследованием близнецов показал, что наследуемость абсолютного слуха составляет 0,81, что означает наличие сильного генетического компонента признака (помните, что наследуемость колеблется от 0,0 до 1,0, а значения ближе к 1,0 указывают на

полный генетический контроль над признаком). С помощью методов, основанных на изучении генома, исследователи пытались локализовать генетические элементы, вовлеченные в абсолютный слух, и обнаружили несколько генов, которые связаны с этой способностью. Один из них, расположенный на хромосоме 8, появляется в большинстве исследований, которые пытаются связать абсолютный слух с генетикой. Ген, на котором сосредоточено внимание, играет важную роль в памяти и познании. Есть и другие локусы — кандидаты на то, чтобы считаться ответственными за это качество, и они обычно участвуют в развитии внутреннего уха.

Врожденную амузию нельзя назвать генетической противоположностью абсолютного слуха, она включает в себя отсутствие способностей определять высоту тона и запоминать мелодии. Как следует из названия, она передается по наследству, и ее нейронанатомия хорошо изучена. В частности, амузия оказывает значи-

19.1 | ГДЕ НАХОДЯТСЯ ГЕНЫ АБСОЛЮТНОГО СЛУХА?

Особое расположение связанного гена — 8q24.21. Локусы генома начинаются с номера хромосомы, а потом идет отметка, показывающая, находится ли локус на одном конце хромосомы (p) или на другом (q). У человеческой хромосомы есть центромера, отделяющая короткий конец (p) от длинного конца (q). Затем местоположение локуса задается координатами, очень похожими на линейку. Ген 8q24.21 считается ADCY8, или аденилатциклазой 8, которая имеет очень специфическую клеточную функцию в клеточной мембране. Это также ген, который, как полагают, принимает участие в памяти и познании. Локусы, участвующие в развитии абсолютного слуха, также могут быть вовлечены в развитие внутреннего уха и нейронных связей и онтогенез. Если локусы, участвующие в нейронных связях, действительно задействованы, то это подтверждает мысль, что абсолютный слух появляется в результате сокращений связей в мозге.

тельное влияние на слуховую кору и в этом контексте имеет весьма различную нейробиологическую этиологию, но действительно не включает в себя те самые гены, которые определяют абсолютный слух. На сегодняшний день генетическая основа врожденной амузии предполагается, но генетический локус, который она затрагивает, неизвестен.

Есть и другой способ обнаружить гены, отвечающие за музыкальные способности или склонности. Надо задаться вопросом: как естественный отбор генома сказывается на музыкантах? При этом подходе в геноме ищут гены, в которых последовательности ДНК изменились особым образом, что подразумевает естественный отбор. В некоторых тестах геном сканируется область за областью, чтобы была возможность увидеть, происходят ли последовательности ДНК в неслучайных распределениях. Если у гена действительно есть профиль изменения, где он статистически кажется необычным, его помечают как потенциальный ген, вовлеченный в тот или иной признак. В одном из таких исследований изучили геномы 150 финнов, а в качестве необычного признака взяли музыкальные способности. Результаты показали, что определенные гены проявляют признаки естественного отбора, причем некоторые из них участвуют как в развитии внутреннего уха, так и в аспектах развития познавательных способностей. Интересно, что кое-какие обнаруженные у людей гены с неизвестными функциями есть и у певчих птиц, у которых они отвечают за восприятие песен и пение. Ранее я уже отмечал, что эти генетические исследования настолько же хороши, насколько хороша и характеристика фенотипа. Если у вас возникают сложности с определением фенотипа, то поиск генетического коррелята будет либо затруднительным, либо введет в заблуждение. Абсолютный слух и амузию можно обнаружить с помощью простых тестов, поэтому генетическая основа этих признаков довольно сильна. Другие черты, которые ученые исследовали в отношении музыки, труднее определить в качестве фенотипов. Склонность к музыке, музыкальные способности и предпочтения — эти черты сложнее исследовать из-за их размытости. Но, глядя на них, мы

приближаемся к пониманию, почему и как музыка успокаивает дикого зверя.

Чтобы количественно оценить музыкальные способности, которые нельзя четко определить, исследователи обратились к стандартизированным тестам (таким как музыкальный тест Карма), позволяющим помещать людей в спектр ценностей. При выполнении этого теста людям проигрывают короткие абстрактные звукозаписи, формирующие иерархические музыкальные структуры в результате их повторения. Человек слушает несколько различных записей, а затем его просят найти различия в них. То, насколько точно испытуемый описывает различия, можно изобразить в виде шкалы. Тест интересен тем, что он был разработан таким образом, чтобы отсеять фактор музыкальной подготовки среди множества других. Есть и другие тесты, например тест Сишора и тест на точность воспроизведения тона. В тесте Сишора испытуемый слышит пары звуков с небольшими различиями по высоте и длительности. Затем его просят назвать разницу между этими парами. Тесты определяют более простые аспекты сенсорной способности к музыке, такие как высота тона и длительность. Проходя тест на точность воспроизведения тона, человек сначала слушает звук определенной высоты через наушники, а затем его просят спеть ноту, которую он услышал. Этот результат легко оценить, и человеку присваивается количественный показатель музыкальных способностей.

С музыкальными предпочтениями дело обстоит по-другому, если речь идет об измерительных тестах, потому что здесь оценивается мнение человека относительно определенного вида (жанра) музыки. Если тест проходит ребенок, то используют прием с привлечением внимания. Самым распространенным считается Короткий тест на музыкальные предпочтения (STOMP — *The Short Test of Music Preferences*). Испытуемый должен прослушать от четырнадцати до двадцати трех композиций разных музыкальных жанров, а затем его просят оценить каждый жанр по шкале от 1 до 7 (где 1 — совершенно не нравится, а 7 — очень нравится). Некоторые исследователи пошли дальше и просят участников

сочинить эссе, описывающее музыкальные жанры или даже песни. В одном исследовании ученые получили более 2500 подобных эссе, с помощью которых и оценивались музыкальные предпочтения испытуемых.

Было высказано несколько интересных идей о музыкальных способностях и предпочтениях, хотя нужно учитывать обычные пояснения, необходимые для такой работы. Например, используя количественную оценку музыкальных способностей, ученые рассмотрели в аспекте генетики несколько потенциальных черт, связанных с ними. Эти второстепенные черты включают в себя распознавание высоты тона и ритма, музыкальную память, слушание музыки, пение и музыкальное творчество. В ходе исследования генома было выявлено несколько локусов, отвечающих за распознавание тона. Оказалось, что многие гены, обнаруженные таким образом, участвуют в развитии нервной системы или в поддержании нервной ткани. Есть пара генов, которая особенно важна в развитии внутреннего уха для тех структур, что воспринимают внешние вибрации звука: для улитки и крошечных волосков. Один ген, в частности, кодирует белок, важный для определения высоты тона и ритма, музыкальной памяти и прослушивания музыки. Этот ген называется AVPR1A, и формально он известен как сосудосуживающий фактор, белок, участвующий в регулировании количества воды в организме и кровяного давления. Второе название гормона AVP — вазопрессин. Предположительно, он связан с аутизмом и влияет на формирование межличностного поведения. Другой ген, вероятно участвующий в развитии музыкальных способностей, называется протокадгерин. Этот мембранный белок, регулирующий межклеточную адгезию, очень важен для структуры улитки.

Кроме того, музыкальные предпочтения были изучены в контексте того, как музыка влияет на эмоциональный склад человека. Существует много работ о пересечении музыкальных предпочтений с личностными характеристиками, которые рассматривают вопрос о том, могут ли музыкальные предпочтения определить личность. И некоторые тесты действительно показывают четкую

корреляцию между этими признаками. В одном крупном исследовании использовали пятифакторную модель личности. Ученые пытались расположить черты личности по шкале со следующими дескрипторами: экстраверсия, доброжелательность, сознательность, невротизм и открытость опыту. Эти личностные характеристики рассматривались в контексте музыкальных предпочтений по нескольким жанрам. В результате опроса выяснилось, что тексты песен и музыкальные жанры коррелируют с личностью: открытость опыту соотносится с эксцентричной музыкой, такой как панк и дэт-метал, а экстраверсия — с поп-музыкой. По сути, исследователи предполагают, что одно (личность) может быть использовано для предсказания другого (предпочтительного жанра) и наоборот.

Другие исследования выявляют сходные закономерности, указывающие на то, что люди, открытые приобретению нового опыта, более склонны иметь предпочтения к сложной музыке — к классике и такой современной продвинутой музыке, как панк-рок. При этом экстраверты предпочитают поп-музыку, исполняемую группами молодых музыкантов, или ритмичную, как хип-хоп. С этой же точки зрения был изучен фактор склонности к правонарушениям. Используя описанные выше системы отчетности и базу данных о правонарушениях участников, Том тер Богт, Лоэс Кейзерс и Вим Мееус показали, что «громкая, дикая и девиантная музыка», такая как хеви-метал, панк, музыка готов, рэп и техно-хаус, коррелирует со склонностью к преступности у старших подростков. Классическая музыка и поп-музыка никак не связаны с преступностью. Совместно эти данные указывают на то, что ранние музыкальные предпочтения способны предупредить о наличии склонности к нарушению закона, которая может проявиться в более позднем возрасте. Мне неприятно это признавать, но, возможно, мои родители были правы, когда запретили мне дома слушать песню *The Pusher* («Наркодилер») группы Steppenwolf. Рок-музыка и протопанк, которые я слушал в детстве, не довели меня до тюрьмы, но я уверен, что определенное нарушающее принятые нормы поведение с моей стороны произ-

растает именно оттуда. Но разве делинквентное поведение — это плохо? Если вы когда-нибудь были родителем буйного шестнадцатилетнего подростка, то ответ очевиден. Но некоторые ученые предполагают, что на самом деле такая музыка, как панк и хеви-метал, связана с открытостью и склонностью к исследованиям.

Виды генов, которые были точно определены как имеющие отношение к музыкальным способностям, многое говорят нам о действии музыки на мозг. Психологическое тестирование, проведенное для понимания музыкальных предпочтений, тоже способно поведать серьезные вещи о музыке. Музыка поступает в мозг через уши, поэтому гены, которые важны для развития и структуры внутреннего уха, участвуют в первичной обработке звуков, подобных музыке. Попав в мозг, музыка обрабатывается в определенных его областях, а результат этой обработки диктует то, как конкретные виды музыки влияют на нас, пробуждая эмоции и воспоминания.

Томас Шефер и его коллеги опросили более восьмисот испытуемых и смогли предположить, что люди слушают музыку для «создания возбуждения и настроения», для «достижения самосознания» и в качестве «выражения социальной близости» (см. вставку 19.2). Первые две функции оказались более влиятельными, чем третья. Следует отметить, что в исследовании принимали участие говорящие по-немецки люди от восьми до восьмидесяти лет. Хотя результаты этого эксперимента очень интересны в отношении определения того, для чего люди слушают музыку, сами музыкальные предпочтения могут сильно зависеть от конкретной культуры, поэтому было бы интересно посмотреть, как люди других культур рассматривают музыку в этом функциональном контексте.

Чтобы решить проблему влияния культуры на музыкальные предпочтения и создание музыки, Патрик Сэвадж и его коллеги исследовали музыку в девяти географических регионах мира. Они рассмотрели тридцать две особенности музыки в 304 музыкальных записях со всего света. Взгляд на музыку вне культурного контекста привел к открытию не поддающихся четкой

19.2 | ЗАЧЕМ МЫ СЛУШАЕМ МУЗЫКУ

Томас Шефер предполагает, что существует более ста причин слушать музыку. Вместе с коллегами он провел исследование, где участникам нужно было ответить на 129 вопросов, похожих на те, что приведены ниже. Получив ответы, ученые разделили музыкальные предпочтения на равное количество причин.

Мне нравится музыка (пожалуйста, оцените, насколько верно для вас утверждение, поставив от 1 (совсем не согласен) до 6 (полностью согласен) баллов):

- Потому что она помогает мне думать.
- Потому что это возможность побыть наедине с собой.
- Потому что у меня от нее мурашки по телу.
- Потому что она будит во мне чувство прекрасного.
- Потому что она напоминает мне о конкретном человеке.
- Потому что с музыкой я ощущаю свое тело.
- Потому что я получаю удовольствие от этого вида искусства.

...и так далее, обозначив 129 пунктов, которые соответствовали 129 функциям музыки.

диагностике универсалий в различных областях земного шара, и это предполагает, что музыка не может быть универсальным языком человечества, как многие думают. Однако восемнадцать из тридцати двух признаков музыки действительно демонстрируют статистическую глобальную корреляцию, причем десять из них находятся в определенном родстве, то есть они связаны друг с другом больше, чем с другими признаками. Статистические характеристики основаны на атрибутах музыки, которые, как предполагалось, были универсальными: на высоте тона и ритме. Другие обнаруженные с помощью этого подхода особенности обычно

не считаются универсалиями музыкальных предпочтений, к ним относятся стиль исполнения и социальный контекст. Однако кросс-культурный контекст становится важен при попытке определить, что такое музыка, а также для того, чтобы соотнести музыке с функцией.

Кроме того, ученые изучали физиологическую реакцию организма на музыку через ее воздействие на мозг. Эксперименты по изучению этого аспекта музыки включают противопоставление физиологической реакции людей на стресс после прослушивания трех разных звуковых фонов: *Miserere* Григорио Аллегри (хоровая пьеса, написанная в XVII веке для Сикстинской капеллы), звук журчащей воды и тишина. После прослушивания экспериментатор намеренно вызывает стрессовое состояние у испытуемых. Затем у каждого участника измеряют физиологические маркеры стресса — уровень кортизола, частоту сердечных сокращений и синусовую аритмию, а также фиксируют уровни стресса и тревоги, о которых сообщает сам подопытный. Первая часть теста даже приятна, особенно во время прослушивания *Miserere* — красивого успокаивающего музыкального произведения. А вот «стрессовая» часть больше похожа на пытку. Исследователи, проводившие этот опрос, подумали о двух наиболее стрессовых ситуациях, которые взрослый может пережить без психологического хаоса: это собеседование по вопросу о приеме на работу и решение сложной арифметической задачи перед аудиторией. Мне есть что сказать про стресс, вызванный второй ситуацией: приходилось «блистать» своими математическими способностями перед публикой. В начале академической карьеры я занимал должность старшего преподавателя в Йельском университете. До этого я никогда раньше не преподавал, но чувствовал некоторую уверенность в своей способности объяснить популяционную генетику — науку, требующую время от времени прибегать к математике. Во время моей первой лекции для изучающих генетику студентов я решил вывести математическое уравнение, не пользуясь никакими бумажками. Я начал за здравие с основных частей уравнения, но быстро потерялся — и все это перед сотней студентов Йельско-

го университета! Мой уровень стресса значительно повысился, когда я попытался восстановить недостающие части уравнения, а потом произошло и самое ужасное: студенты начали смеяться надо мной. Разумеется, мой уровень стресса взлетел до небес. Так что да, это мучительный способ ввергнуть человека в стресс, но это точно работает. Конечно, идея исследования заключается в том, чтобы увидеть, могут ли успокаивающая музыка *Miserere* и потенциально успокаивающий звук воды облегчить степень стресса, который человек испытает позже. Результаты показывают, что прослушивание *Miserere* (расслабляющей музыки) перед стрессовой ситуацией не делает человека менее восприимчивым к стрессу. Однако музыкальная терапия перед инициированием стресса способствует более быстрому послестрессовому восстановлению.

Стресс — это только одна из эмоциональных и физиологических реакций, которые поддаются управлению при помощи музыки. Талия Уитли и ее коллеги применили так называемую умную анимацию, чтобы отразить эмоции, и это позволило исследовать эмоциональный контекст музыки у студентов Дартмутского колледжа и членов племени креунг из Камбоджи. Ученые использовали хитроумное устройство под названием Мистер Болл, чтобы оценить эмоциональный уровень и музыкальные предпочтения.

Мистер Болл — упругий красный мячик. Можно менять его внешность и тем самым моделировать разные эмоции. Внешний вид Мистера Болла контролируется пятью скользящими регуляторами, которые человек может перемещать, чтобы выразить эмоцию. В одном эксперименте с использованием анимации группу испытуемых попросили манипулировать Мистером Боллом, используя один из пяти регуляторов, показывающих счастье, печаль, спокойствие, гнев или страх. В другой анимации регуляторы представляли некоторые аспекты музыки, соответствующие определенным характеристикам движения. Так, например, первый регулятор контролировал скорость подпрыгивания и скорость музыки. Второй отвечал за нервные подергивания и скачки музыки. Плавное движение и согласованные с ними музыкаль-

ные звуки возлагались на третий регулятор. Четвертый управлял размером шага и изменениями нот, а пятый — направлением шага и сменой тонов. Ключ к эксперименту заключался в том, что одна группа испытуемых использовала движения Мистера Болла, не слыша музыку, как способ выражения эмоции, а другая использовала музыку, не видя движения, для выражения запрашиваемой эмоции.

Интересно, что, когда человека просили сделать, скажем, сердитого Мистера Болла, положения регуляторов для музыки и для движения практически совпадали (рис. 19.1). Аналогичный результат получился, когда камбоджийцы из племени креунг прошли тот же тест, что указывает на кросс-культурный контекст при выполнении этой задачи. Данный эксперимент фактически затрагивает вопросы о кросс-модальности зрения и звука, но в эмоциональном контексте. Результат показывает, что и движение, и музыка активируют области мозга, связанные с эмоциями, которые находятся глубоко в мозге — в лимбической системе, где они и обрабатываются. Эта неоспоримая связь эмоций с музыкой также очевидна в случае с литературой и искусством. Разница в том, как чувственная информация попадает в мозг и куда она потом перемещается.

В 2005 году, за два года до того, как Джона Лерер предположил, что Пруст был нейробиологом, журнал Nature опубликовал статью нейробиолога Патрика Каваны, где тот написал, что художники веками успешно занимались изучением нейробиологии и визуальных процессов. Он представил несколько интригующих примеров из искусства эпохи Возрождения, где художники умело использовали игру света и тени. Они прибегали к таким хитроумным методам применения освещения и полутонов, которые наблюдатель редко замечает, если замечает вообще. Эти трюки включают в себя использование подсветки и затемнений зданий для создания перспективы за счет невозможных физических атрибутов теней и полутонов. Кавана сделал очень интересный вывод о том, что некоторые атрибуты искусства не менялись в течение тысячелетий. Например, линейный рисунок использовался



Рис. 19.1. Мистер Болл в разных ипостасях (счастливый слева, злой справа), как его представляют участникам опроса Уитли и ее коллеги

еще на ранней стадии истории известного искусства. Наскальные рисунки, сделанные пятнадцать тысяч лет назад в пещерах Ласко во Франции, похожи на изображения животных из V века, а также на современные линейные рисунки. Кавана указывает, что древние художники экспериментировали с рисованием линий, чтобы зрители могли воспринимать и идентифицировать объекты, которые они пытались изобразить. И, судя по самым ранним из известных картин, на которых запечатлены животные, у них это получалось. Эта техника проявляется и в скульптурах и восходит так же далеко, как рисунки в пещере Ласко, о чем свидетельствует превосходно вырезанная в камне лошадь из скального убежища, известного как Абри-де-Кап-Блан во Франции (которой тоже пятнадцать тысяч лет).

Когда эта техника освоена, остальное сводится к тому, что по сути и представляет собой искусство, — к созданию интересных, необычных и странных способов игры с ней. Как говорил известный нейробиолог Вилейанур Рамачандран (см. главу 12), который много вложил в развитие идей о связи искусства и нейробиологии: «Цель искусства состоит в том, чтобы усиливать, превосходить или даже искажать реальность». Это базовое знание — художественный прием, от которого нельзя «отучить», он «вшит» в мозг художников и тех, для кого они работают. Рамачандрана раскритиковали за упрощенное объяснение искусства как нейробиологического процесса, потому что его высказывание минимизирует значимость эмоций, памяти и интеллектуального

намерения. Но то, что предлагает Рамачандран, можно считать хорошей отправной точкой, потому что искусство начинается с наших чувств. Если существуют сложные петли обратной связи с эмоциями, памятью и намерением, то это все вторично по отношению к тому первоначальному впечатлению, которое производит на нас искусство. Кавана показывает это следующим образом: «Расхождения между реальным миром и миром, изображаемым художниками, раскрывают столько же о мозге внутри нас, сколько художник раскрывает о мире вокруг нас». Итак, изучение художников и людей, которые любят их работы, стало интересным и продуктивным способом узнать не только то, из чего сделано искусство с нейробиологической точки зрения, но и то, как работает наш мозг в целом.

Другие художественные методы — прозрачность картины, использование двух измерений для передачи трехмерных изображений, неполное изображение, заставляющее зрителя мысленно дополнить его, а также рассуждения об искусстве — также имеют нейробиологический характер. Здесь Кавана снова приводит несколько прекрасных объектов искусства с нейробиологическими объяснениями производимых ими визуальных эффектов. (Читателям стоит обратиться к оригинальной статье в журнале *Nature*, чтобы получить представление о связи нейробиологии и живописи.)

Одно из моих любимых художественных направлений — кубизм. Часто в кубизме представлено достаточно от предмета, чтобы заставить мозг определить, что именно видит глаз. Мне нравятся работы кубистов, потому что они вызывают во мне основную биологическую реакцию: сначала я просто смотрю на них, а затем позволяю своему воображению разгуляться. Эта способность воспринимать произведения искусства кубистов и идентифицировать изображенные объекты — неврологическая функция, которая, скорее всего, развилась у наших общих предков в далеком прошлом. С точки зрения эволюции важно, чтобы любая зрительная информация, которую собирает сетчатка, была ментально идентифицирована, чтобы мы могли быстро решить:

убежать от объекта, съесть его или попытаться спариться с ним. Иногда в природе сетчатка глаза собирает информацию только о фрагментах объекта: представьте себе пресловутую змею в траве или торчащую из-за скалы морду гиены. Но организмам нужно быстро принимать необходимое для выживания решение об увиденном предмете. Кубизм использовал эту основную визуальную нейронную функцию «заполнения» и манипулировал ею для создания интригующих и впечатляющих произведений искусства. Наконец, кубизм вызывает не только к нашему так называемому мозгу ящерицы или рептилии. Эффект, производимый им, гораздо шире, потому что волны сигналов посылаются по всему мозгу после того, как объект распознается в его внутренней части. Вероятнее всего, эта информация для постобработки перемещается в те же самые области мозга, что и информация об абстрактных произведениях искусства, таких как «живопись действия» Джексона Поллока, или о картине эпохи Возрождения, такой как «Мона Лиза» Леонардо да Винчи.

Один из способов проанализировать то, что связано с восприятием искусства, — это имитировать искусство с очевидными, устоявшимися в восприятии арт-объектами, а затем анализировать реакцию людей на симулированное искусство. Используя компьютерное моделирование произведений искусства с помощью программы, которая называется *Painting Fool*, исследователи предприняли попытки проанализировать, как делается искусство на неврологическом уровне.

Эта компьютерная программа — детище Саймона Колтона; есть и сайт для производства имитированного искусства. Поработав с ней некоторое время, я понял, что *Painting Fool* обладает личностью и определенной степенью гордости за свою работу, в результате чего иногда получаются очень интересные визуальные продукты. И действительно, *Painting Fool* была запрограммирована на имитацию рациональных движений и художественных приемов по мере создания произведения искусства. Исследователи могут перевернуть этот подход с ног на голову и запрограммировать его на иррациональные действия, а затем задать вопрос:

«Что происходит?» Как ни странно, *Painting Fool* выдает довольно своеобразное галлюциногенное искусство, если подправить те рациональные правила искусства, по которым она обычно работает. Этот результат показывает, что творчество и галлюцинации связаны в искусстве интересным и убедительным образом. Достаточно взглянуть на «глухое» искусство сюрреалистов, чтобы увидеть логику этого подхода.

Есть наблюдения, говорящие, что способности к искусству развиваются в семьях, что свидетельствует о генетическом компоненте. Любое ориентированное на искусство генетическое исследование почти обязательно касается визуального ввода и оценки эстетических предпочтений. Сетчатка глаза — своего рода портал, через который информация об искусстве попадает в нервную систему. Следовательно, любая черта, тесно сопряженная с усиленным функционированием сетчатки, может быть похожа на идеальный слух, взаимодействующий с музыкой, и, возможно, напрямую связана с искусством. Поскольку мы много знаем о структуре сетчатки, изучение ее составных частей может быть правильным шагом к тому, чтобы связать гены с восприятием искусства и предпочтениями. Первое, и главное, требование к строению сетчатки глаза для просмотра произведений искусства — это правильное развитие палочек и колбочек. Без этих собирающих световые волны клеток возникает слепота. Это не значит, что слепые люди не могут наслаждаться искусством — у них все еще остается осязание. Знакомство с фреской «Тайная вечеря» Леонардо да Винчи в монастыре Санта-Мария делле Грацие в Милане — это потрясающий визуальный опыт. А совсем рядом с этим шедевром в большой комнате находится трехмерная рельефная скульптура знаменитой сцены. Ее поместили туда специально для слепых, но, даже если вы можете видеть, лучше закрыть глаза и ощупать рельеф руками, чтобы испытать очень сильное переживание.

Следующим структурным аспектом сетчатки будет то, какие виды палочек и колбочек существуют в ней, и касается он опсинов, встроенных в их мембраны. В главе 9 мы рассмотрели, что люди,

известные как тетрахроматы, имеют дополнительные гены опсина, и те делают белки чувствительными к цветам, которые нормальные люди (или трихроматы) не видят. В дополнение к цветовосприятию опсины в палочковых и колбочковых клетках собирают информацию о восприятии размытого изображения и глубины. В ходе ряда исследований были изучены художники-тетрахроматы для установления взаимосвязи этой черты со способностью создавать и воспринимать произведения искусства. Результаты показали, что тетрахроматы совсем по-другому воспринимают и создают искусство, нежели обычные трихроматы. Это не означает, что работы тетрахроматов качественно лучше или что они воспринимают искусство лучше, чем трихроматы; скорее созданные ими картины сделаны в уникальной с сенсорной точки зрения манере. Другие аспекты зрения тоже улучшают наше восприятие и интерпретацию световых волн. Зрительный поток в человеческом мозге очень хорошо известен, и в конечном итоге, возможно, будет доказано, что некоторые нейронные связи в этих областях мозга влияют на то, как мы создаем и воспринимаем искусство.

Наши органы чувств получают информацию из внешнего мира и преобразуют ее в восприятие, а затем в смысл. Из приведенных в этой главе примеров следует, что при поступлении информации в мозг процессы у большинства высших организмов, особенно у позвоночных, схожи. Однако не менее очевидно и то, что наш вид (по сравнению с другими живущими на этой планете организмами) однозначно превращает исходную информацию в нечто уникальное. Удивительно осознавать, что человек постоянно пытается улучшить свои чувства и, следовательно, свое восприятие внешнего мира. Практически нет пределов тому, как мы можем и будем воспринимать все, что нас окружает. Отсутствие этих ограничений означает, что у нас есть возможность исправить недостатки некоторых наших собратьев в области чувств. Но это также дает надежду и на то, что какие-то аспекты вселенной, которые мы пока не видим, не чувствуем, не слышим, не ощущаем на вкус или не определяем по запаху, в скором времени будут нам доступны.

НЕТ ПРЕДЕЛОВ

Пределы работы органов чувств и будущее чувств

Впервые я увидел его на сцене проекта TED¹. Я не знал, кто это был, поэтому в качестве первой реакции на его наряд выдал: «О чем он думал, когда выходил из дома?» Он был одет в яркую синюю рубашку, розовый пиджак, ярко-желтые брюки, а на его ногах красовались черно-белые кожаные туфли, как у Элвиса Пресли. Я даже боюсь подумать, какого цвета носки он носит. Это был человек по имени Нейл Харбиссон. Он художник и один из самых известных на планете людей с монохромным зрением. Если помните, в главе 10 я рассказывал, что монохроматы различают только черный и белый цвета, поэтому Харбиссон видит мир, как он любит говорить сам, как будто смотрит телевизор в 50-е годы прошлого века, то есть ему доступно только черно-белое изображение с оттенками серого. Но у этого человека есть

¹ TED (аббревиатура от англ. *technology, entertainment, design*; технологии, развлечения, дизайн) — американский частный некоммерческий фонд, известный прежде всего своими ежегодными конференциями, которые проводятся с 1984 года в городе Монтерей (США), а с 2009 года — в городе Лонг-Бич (США). Миссия конференции состоит в распространении уникальных идей (*ideas worth spreading*), избранные лекции доступны на веб-сайте конференции. Темы лекций разнообразны: наука, искусство, дизайн, политика, культура, бизнес, глобальные проблемы, технологии и развлечения.

одна интересная особенность, за что он называет себя «киборгом». Он носит на голове небольшой прибор, похожий на камеру, который крепится на затылке и издает звуки, когда в его поле зрения попадает цветной предмет. Когда Нейл наводит камеру на грязный желтый носок, та издает высокий писк, а когда на красный носовой платок — более низкий и мягкий звук. Харбиссон научился использовать звуковую вибрацию, издаваемую прибором, чтобы различать цвета. После того как он стал «киборгом», в его черно-белой жизни появился цвет.

Как мы видели в этой книге, наши чувства имеют физические ограничения, налагаемые на них структурами, которые собирают и интерпретируют информацию из внешнего мира. Но не эти сдерживающие факторы накладывают рамки на чувства человека. Наша способность видеть ограничена, потому что сетчатка воспринимает только узкий спектр электромагнитных волн, составляющих свет. Электромагнитные волны занимают общий спектр волн с длиной 100 000 километров (100 000 000 000 метров) до 1,0 пикометра (0,000000000001 метра), то есть более двадцати четырех порядков величин. Видимый человеком спектр включает всего несколько сотен нанометров. Другими словами, диапазон световых волн, которые доступны людям, составляет какие-то ничтожные 0,000000000000000000000001 от всего спектра. При этом мы знаем, что излучение от всех остальных волн тоже существует, поэтому мы даже разработали вспомогательные средства, которые помогают нам либо увидеть его, либо зафиксировать результат, который дает свет, приносимый не видимыми глазом волнами.

Если говорить о звуке, мы слышим звуковые волны в диапазоне от 20 до 20 000 Герц — это больше четырех порядков. Все остальные звуки неразличимы для человеческого уха. Однако известно, что эти неслышимые звуки существуют, поэтому мы и создали инструменты для их определения, ведь физическому и нейробиологическому механизму человека эта возможность недоступна. Как мы видели на примере с запахами, у нас относительно большое количество генов обонятельных рецепторов, и в результате мы способны чувствовать довольно обширный спектр

запахов. По одной из версий, упомянутых в этой книге, — более 10^{12} (более триллиона). Это огромное количество, но тем не менее всего лишь малая часть того, что существует на планете. При этом, опять же, мы можем охарактеризовать и те запахи, которые с точки зрения нашей нейробиологии ничем не пахнут.

Нейробиологические механизмы вкусов и запахов очень похожи, оба они хемосенсорные. При этом вкусовых рецепторов у нас намного меньше, и есть всего пять категорий, которые распознает наша вкусовая сенсорная система. И да, мы знаем, что количество молекул, взаимодействующих с нашими вкусовыми сосочками, намного больше, чем мы способны воспринимать. У нас просто-напросто нет рецепторов для восприятия этих молекул, но мы знаем, что они существуют, и пытаемся найти методы, с помощью которых сможем их определить. Ведь вполне возможно, что мы, обладая столь изобретательным умом, таким как у Чарльза Спенса (см. главу 15), найдем способ различить даже больше запахов, чем тот триллион, которые уже можем почувствовать.

Ограниченность диапазона восприятия тех чувств, которыми мы располагаем, — результат того, насколько хорошо биология нашего организма настроена на наши чувства. Но, когда наши научные, культурные или социальные потребности превысили диапазон биологических чувств, мы нашли способ сделать так, чтобы природа нас не ограничивала, и это не менее важно для существования современного человека. Рентген, звуковой эхолот, магнитно-резонансная томография и микроскопия — вот лишь малая часть из великого множества изобретений, ежедневно позволяющих нам выходить за рамки собственной биологии.

Мой любимый пример — ДНК-секвенирование. Еще шестьдесят лет назад наш вид даже не идентифицировал молекулу ДНК как наследственный материал и понятия не имел, из чего она состоит и как образуется. Вплоть до 50-х годов XX века исследователи в области химии и физики открывали потрясающую информацию о структуре «невидимых» соединений, таких как белки и углеводы (компоненты живых организмов), что было еще одним не менее впечатляющим достижением, расширяю-

щим наши горизонты. Однако люди смогли преумножить знания по химии, потому что вышли за пределы диапазона своих чувств. Для визуализации трехмерной структуры молекул использовали рентгеновские лучи. И действительно, огромным шагом в области расшифровки физической структуры этой важной молекулы было использование рентгеновских лучей для изучения кристаллических структур молекул, таких как ДНК. В 1953 году Джеймс Уотсон, Фрэнсис Крик, Морис Уилкинс и Розалинд Франклин смогли зафиксировать структуру ДНК в виде двойной спирали диаметром 10 ангстрем. Этот диаметр на несколько порядков выходит за пределы диапазона, который мы обычно способны видеть глазами. Но эта структура была важна, потому что, как несколько иронично отметили Уотсон и Крик в статье 1953 года в журнале *Nature*, предложенная структура не избежала их внимания, «и, если посмотреть на эту парную структуру, становится понятен возможный механизм копирования генетического материала». Чтобы увидеть двойную спираль и понять, как она работает при переносе генетической информации, было необходимо, чтобы человек научился видеть в рентгеновском диапазоне электромагнитного излучения. После получения этих данных следующим шагом становилось выяснение механизма, с помощью которого ДНК передает наследственную информацию. В нескольких главах этой книги я показал вам, что представляют собой последовательности ДНК и почему они важны. Но как на самом деле ученые «видят» те нуклеотиды (G, A, T и C), которые составляют последовательности? Размер нуклеотида слишком мал (даже меньше чем 10 ангстрем — диаметр двойной спирали ДНК), чтобы его можно было увидеть даже через самые мощные используемые учеными электронные микроскопы. Прочтение состава жизни (так называют наш геном) — отличный пример преодоления сенсорного шума и способности выйти за ограниченный диапазон восприятия и интерпретации набора предложенных сенсорных ориентиров, которые не имели бы никакого смысла для любых других видов на планете. В этом отношении способ, которым мы видим ДНК, — по сути «тайное знание», и только несколько

миллионов человек на Земле могут получить сенсорную информацию, собранную с целью прочесть последовательность генома и понять его. В основном ученые использовали химическую природу нуклеотидов и ДНК для усиления сигналов, чтобы дать нам визуальную последовательность нуклеотидов, которую мы интерпретируем как последовательность ДНК. Вместо световых волн, воспринимаемых в качестве сенсорной информации, используются химические реакции. Затем на выходе они интерпретируются в зрительную информацию на экране компьютера, и уже ее можно увидеть глазами. Это похоже на волшебство, хотя на самом деле есть несколько базовых, но оригинальных изобретений, позволяющих прочесть эти маленькие молекулы за пределами нашего визуального диапазона. Это не просто способность видеть маленькие объекты, которые мы обнаружили. Большинство тех, кто сейчас занимается астрономией и астрофизикой, берут данные, которые не имеют почти ничего общего с нашей развитой способностью видеть, и преобразуют их в изображения, которые мы можем видеть и интерпретировать. Хотя оптический телескоп усиливает способность сетчатки поглощать световые волны, исходящие от предметов на ночном небе, радиотелескоп принимает радиоволны в несколько раз длиннее тех длин волн, которые мозг использует для интерпретации света, и преобразует данные радиоволн в потрясающе информативные изображения планет и солнц, находящихся за много световых лет от Земли.

В конце 70-х годов XX века я учился в магистратуре в Сент-Луисе и хорошо помню момент, когда мне надо было найти решение для некоего набора данных. У меня было только около ста позиций данных, но мне нужно было сделать вычисления для 10 395 возможных перестановок. В то время подобные проблемы решались с помощью карандаша и блокнота, как в фильме «Скрытые фигуры», номинированном на «Оскар» в 2017 году. Группа одаренных в математике людей получила бы данные и провела бы расчет для всех десяти тысяч с лишним перестановок. Мой дипломный проект не был связан с национальной безопасностью и не имел отношения к НАСА, поэтому у меня не было такой

роскоши, как целая армия преданных карандашей, готовых вмиг произвести любые вычисления. И тогда я обратился к новой возможности — компьютеру. Дело было на заре развития технологий, программы и данные кодировались на перфокартах и считывались с помощью гигантской машины. Затем требовалось много времени, чтобы получить бело-зеленую распечатку, с которой уже можно было работать. Способ неуклюжий по меньшей мере. Мой первый аспирант написал свою диссертацию в конце 80-х годов прошлого века на Apple Macintosh, который он использовал для выполнения большинства вычислений, подобных тем, что я делал для моей диссертации. Потом у этого аспиранта появились свои аспиранты, и те уже использовали iMac для выполнения работ, а их ученики — iBook. И все это в течение пятнадцати лет. Нынешнее поколение аспирантов использует MacBook Pro, который в десятки тысяч раз мощнее, чем iMac и iBook, и эти современные компьютеры могут подключаться к кластерам процессоров, которые дают им вычислительную мощность в миллиарды раз мощнее, чем использовал мой первый студент. Этот пример просто показывает, что возможности научных вычислений расширились как функция времени по закону Мура.

Гордон Мур еще в 60-х годах XX века осознал, что вычислительная мощность будет удваиваться каждый год. С течением времени пользователи делали все больше компьютерных вычислений, и те становились все более персонализированными — настолько, что о такой персонализации никто не мог раньше и мечтать, разве что те, кто занимался разработкой персонального компьютера — люди вроде Стива Джобса и Билла Гейтса. Эта персонализация день ото дня меняла наш образ жизни, но постепенно изменилось и то, как мы, люди, чувствуем внешний мир. И, учитывая, что закон Мура представляется реальным явлением, мы должны попытаться предвидеть рост вычислительных мощностей и, возможно, даже предугадать и новые изменения, которым подвергнутся наши чувства в результате развития компьютерных технологий.

Согласно опросу компании Nielsen, проведенному в 2016 году, в среднем взрослый житель западного мира проводит перед экраном компьютера или смартфона около десяти часов в день. Учитывая, что мы спим примерно по семь или восемь часов, это означает, что более половины времени бодрствования во многих странах тратится на то, чтобы пялиться на экран компьютера или смартфона, все время просматривая виртуальные изображения. Мы только начинаем осознавать влияние этого царства измененного восприятия на состояние человека. Норвежских десятиклассников исследовали на предмет понимания текстов, прочитанных с экрана компьютера и в старомодной печатной копии. Удивительным результатом было то, что школьники понимали слова на бумаге гораздо лучше, чем на экране. Почему так — не очень понятно, но это указывает на возможную дихотомию в том, как мы, люди, учимся и понимаем прочитанное. Понимание прочитанного следует за зрительным восприятием, и некоторые исследователи обеспокоены долгосрочным влиянием экранов компьютеров и смартфонов на человека и тем, как оно может сказаться на нашей зрительной системе. Эволюция не предполагала, что человек будет бесконечно всматриваться в маленький светоизлучающий прямоугольник. На самом деле наше поле зрения намного больше, чем тот экран смартфона, в который мы утыкаемся каждый день по несколько часов. Как такое ограничение поля зрения скажется на наших глазах и как они будут развиваться в ходе эволюции дальше — пойдя угадай. Зрительное восприятие — не единственное чувство, подвергаемое натиску современной жизни. Как отмечалось в главе 11, на современного человека воздействует невероятное количество звуков (да еще высокой интенсивности и весьма широкого диапазона), с которыми наши предки никогда не сталкивались. Вопрос о том, как мы адаптируемся к этому измененному миру звуков, тоже уже назрел и требует изучения.

Под пристальным взглядом науки оказалась и еще одна область современной жизни, связанная с компьютерами, — игры. Сегодня молодые люди отдают слишком много времени компью-

терным играм. Фатима Йонссон и Харко Верхаген провели исследование влияния игр на разные чувства. Их вывод состоит в том, что, хотя сами игры чрезвычайно сильно воздействуют только на зрение и слух, в игровой процесс вовлечен весь спектр чувств человека вплоть до вкуса и обоняния. На самом деле слуховой аспект видеоигр — это не только звуки, исходящие из компьютера, но и звуки вокруг него, например крики друзей, эмоционально выражающих радость от победы или огорчение от неудачи в игре. И неудивительно, что на вкусовые и обонятельные ощущения, связанные с играми, сильно влияют фастфуд и газировка. Эти восходящие или базовые сенсорные эффекты довольно легко определить, но исследователи также попытались изучить нисходящий эффект воздействия видеоигр на органы чувств. В этой области много сделала психолог Анжелика Ортис де Гортари. Она изучила явление, названное переносом игры, которое проявляется в результате серьезного увлечения этими компьютерными забавами. Некоторые геймеры настолько интенсивно переживают то, что с ними происходит в игре (и их психическое состояние достаточно восприимчиво), что в результате у них появляются псевдогаллюцинации. Также у них проявляются и последствия в работе зрительной системы, которые могут привести к неправильному восприятию реального мира. Ситуация ухудшается с увеличением продолжительности игр и влияет не только на зрительное и слуховое сенсорное восприятие, но также на тактильное и, возможно, на обоняние.

Виртуальная реальность (VR) также стала доступной технологией. В период отпусков в 2016 году на 20% увеличилось использование виртуальных гарнитур в Великобритании, другие западные страны их догоняют. Зрение и слух — не единственные чувства, подвергающиеся действию виртуальной реальности. Предприниматели и инженеры — и Адриан Дэвид Чок один из них — предположили, что воздействовать с помощью VR-аппаратуры можно на все пять аристотелевских чувств. Но как может повлиять VR на них и на наше восприятие мира? Оказывается, можно заранее приспособиться к миру виртуальной реальности.

Андреа Стивенсон Вон и ее коллеги предполагают наличие этой интересной возможности из-за явления, называемого гомункулярной гибкостью. Абстрагирование от реальности под действием ВР может дезориентировать, вызывая физиологические и психологические эффекты. Но гомункулярная гибкость помогает преодолеть эти проблемы и расширить опыт, приобретенный в ВР. Идея гомункулярной гибкости основана на ранних экспериментах с фантомными конечностями. Люди, лишившиеся руки или ноги, часто испытывают сильную боль в том месте, где раньше была их потерянная конечность. Нейробиолог Вилейанур Рамачандран, с которым мы уже встречались на страницах этой книги, изучая синдром Капгра (см. главу 12) и нейробиологию искусства (см. главу 19), просил испытуемого, ощущавшего фантомные боли, поместить свою поврежденную руку или ногу в ящик, в котором по центру было расположено зеркало. Затем тому надо было посмотреть в зеркало так, чтобы поврежденная конечность визуально казалась замененной неповрежденной. И, когда человек двигал неповрежденной конечностью, возникала иллюзия двух нормально движущихся конечностей. После того как человек испытывал эту иллюзию, фантомно-болевым синдромом либо уменьшался, либо вовсе пропадал.

Другой пример гомункулярной гибкости — иллюзия резиновой руки (рис. 20.1). Для подобной иллюзии человек, сидящий слева, помещает одну руку под стол, чтобы ее не было видно. Отдельная резиновая рука находится на столе. Человек, сидящий справа, одновременно поглаживает кончики пальцев скрытой руки и резиновой кисти. Человек слева скоро начинает чувствовать, что резиновая рука принадлежит ему. Это чувство обладания означает, что если кто-то справа размахивает молотком, угрожая ударить резиновую руку, то человек слева будет в ужасе дергаться.

И иллюзии фантомных конечностей, и иллюзии резиновой руки демонстрируют, что людей можно заставить переконфигурировать образ их тела, визуальным обманывая их мозг. Другими словами, наш мозг достаточно гибок, чтобы изменить конфигура-

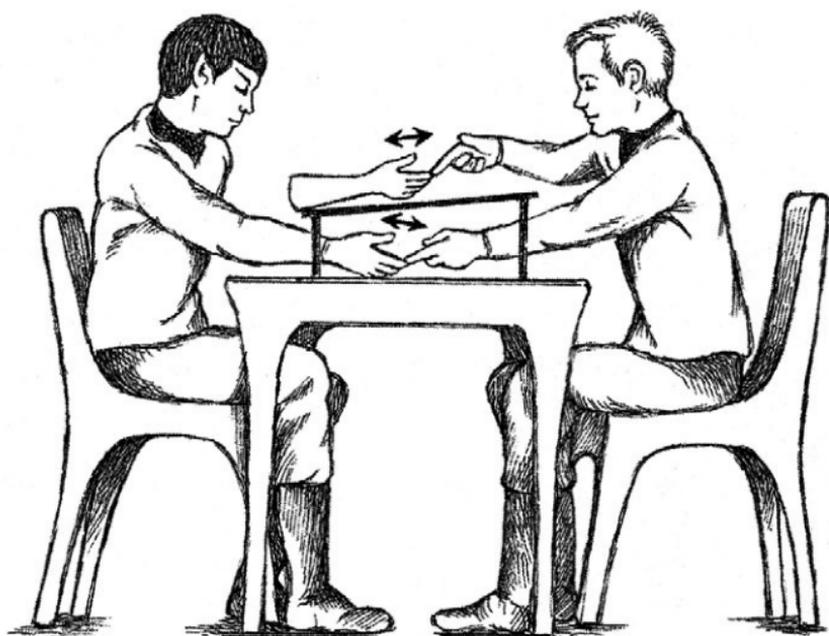


Рис. 20.1. Иллюзия резиновой руки. Человек слева может обмануться, посчитав, что резиновая конечность принадлежит ему

цию нашего сенсорного гомункула (о котором мы подробно говорили в главе 3). Виртуальная реальность подобна превращению всего тела в «призрачную конечность», или же можно считать, что ваш виртуальный аватар превращается в подобие резиновой руки. Наш мозг вполне способен на это.

Виртуальная реальность, смартфоны, технологии в современной космологии, секвенирование ДНК и другие способы расширения нашего восприятия благодаря современным технологиям оказывают огромное влияние на то, как мы смотрим на нашу вселенную, и поднимают вопрос: как человеческий разум будет справляться с этим дивным новым миром? Проблема человеческого разума весьма обширна. Тысячи книг, миллионы (если не миллиарды) слов и множество мыслей были направлены на то, чтобы понять человеческий разум. Эта книга разбирает те вопросы, которые нейробиологи называют простыми проблемами разума или сознания. Эти простые проблемы включают в себя локализацию наших представлений о внешнем мире и работу нашего

восприятия. В некотором смысле мы испытываем определенные трудности при обсуждении этих тем. Мы знаем, как красноречиво писал Фрэнсис Крик, что «огромная совокупность нервных клеток и связанных с ними молекул» ответственна за разум и возникновение сознания. И простые проблемы — это физические аспекты восприятия, вызываемые нервными клетками и молекулами. Но Святой Грааль находится в сфере, которую неврологи называют сложной проблемой сознания. Эта проблема действительно замысловата, потому что заставляет при любом ответе на какие-либо ее вопросы связывать независимое свойство нашей нейробиологии (разума) с физической, молекулярной и химической информацией. Тут мы оказываемся некоторым образом между молотом и наковальней: чтобы подкрепить любые идеи, возникающие касательно сложной проблемы, сначала нужно решить простые проблемы, а решения простых проблем не дают нам полного понимания. В этой книге я использовал эволюционный подход к пониманию чувств и простых проблем разума.

БЛАГОДАРНОСТИ

Я благодарен Джин Томсон Блэк за неизменную редакторскую поддержку и советы во время написания этой книги; также я благодарю Майкла Денина за редакторскую и организационную помощь. Спасибо Вивиан Шварц за то, что она послушно читала и комментировала самые первые версии этой книги, равно как и за помощь в других проектах, над которыми я работал.

Я в неоплатном долгу перед выставочным отделом Американского музея естественной истории за организацию выставки «Наши чувства», которая проходила с ноября 2017 года по июнь 2018 года. Особенно я хотел бы поблагодарить вице-президента выставок Лаури Халдерман. Выставка состоялась исключительно благодаря ее глубокому пониманию всего: от торнадо до нейронов, от черных дыр до осиных гнезд и от микробов до экосистем. Я также благодарю авторский коллектив Американского музея естественной истории: Мартина Швабахера, Александру Немечек и Маргарет Дорнфельд, разработавших проект экспозиции. Благодаря им трудная и отчасти эзотерическая наука о чувствах превращается во что-то удобоваримое для обычного человека. Наконец, я благодарю моего друга и коллегу Иэна Таттерсола за многочисленные беседы (и пиво), которые мы вели в течение последнего десятилетия о науке, эволюции и жизни в целом.

БИБЛИОГРАФИЯ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Безмозглое большинство

Чтобы как можно лучше представить себе, что происходило раньше на Земле, читайте книгу Ника Лейна: Lane (2010). Жизнь микробов в организме человека хорошо описана Робби Данном в кн.: Dunn (2011), — а распределение микроорганизмов в целом в нашей книге, написанной с Сюзанной Перкинс: DeSalle and Perkins (2015). О «провокации Данна» Данн написал сам: Dunn (2009). Высказывание Галилео о чувствах взято из научной работы Пикколино и Уэйда: Piccolino and Wade (2008). В книге Андрия Анишкина: Anishkin et al. (2014) — изложены аргументы в пользу того, что первоначально чувство было реакцией на механическое воздействие, а Басслер и Миллер в кн.: Bassler and Miller (2013) — рассказали о чувстве кворума. О магнитобактериях нам поведали Убе и Шулер: Uebe and Schuler (2016), — а видео с танцующими бактериями можно посмотреть тут: <https://www.youtube.com/watch?v=3uUL4ooM6KI>. Горизонтальная передача у магнитотактических бактерий описана в книге Лефевра и Базылински: Lefevre and Bazyliniski (2013). Доводы за нейробиологию растений приведены в книге Франтишека Балуски: Baluska et al. (2006), — а Полан в кн.: Pollan (2013) — приводит аргументы в пользу разумного поведения растений.

Andriy Anishkin, Stephen H. Loukin, Jinfeng Teng and Ching Kung. Feeling the Hidden Mechanical Forces in Lipid Bilayer Is an Original Sense. 2014.

Proceedings of the National Academy of Sciences 111, no. 22. P. 7898–7905.

Frantisek Baluska, Stefano Mancuso and Dieter Volkmann (eds.). *Communication in Plants: Neuronal Aspects of Plant Life*. Springer, 2006.

Bonnie L. Bassler and Melissa B. Miller. Quorum Sensing. In *The Prokaryotes: Prokaryotic Biology and Symbiotic Associations*. Ed. Eugene Rosenberg et al. Springer, 2013. P. 495–509.

Rob DeSalle, Susan L. Perkins and Patricia J. Wynne. *Welcome to the Microbiome: Getting to Know the Trillions of Bacteria and Other Microbes In, On, and Around You*. Yale University Press, 2015.

Rob Dunn. *Every Living Thing: Man's Obsessive Quest to Catalog Life, from Nanobacteria to New Monkeys*. HarperCollins, 2009.

———. *The Wild Life of Our Bodies*. HarperCollins, 2011.

Nick Lane. *Life Ascending: The Ten Great Inventions of Evolution*. Profile Books, 2010.

Christopher T. Lefevre and Dennis A. Bazylinski. Ecology, Diversity, and Evolution of Magnetotactic Bacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 77, no. 3 (2013). P. 497–526.

Marco Piccolino and Nicholas J. Wade. Galileo's Eye: A New Vision of the Senses in the Work of Galileo Galilei. *Perception* 37, no. 9 (2008). P. 1312–1340.

Michael Pollan. The Intelligent Plant. *New Yorker*, December 23 and 30, 2013.

Rene Uebe and Dirk Schuler. Magnetosome Biogenesis in Magnetotactic Bacteria. *Nature Reviews Microbiology* 14, no. 10 (2016). P. 621–637.

2. Мозг и первомозг

Узнать больше о пластинчатых можно из нашей книги: Eitel et al (2013). Кроме того, об этих многоклеточных животных написано у Бруска: Brusca and Brusca (2003). Историю появления понятия триединого мозга вы найдете в: Pessoa and Hof (2015). Исходная статья Гоулда и Левонтина: Gould and Lewontin (1979) — печат-

талась в разных изданиях. Хорошая статья о «чихающих» губках: Ludeman et al. (2014). Подробное сравнение нейронов и связей беспозвоночных и позвоночных сделано в работе: Sanes and Zipursky (2010).

R. C. Brusca and G. J Brusca. Invertebrates. Sinauer, 2003.

Michael Eitel, Hans-Jurgen Osigus, Rob DeSalle and Bernd Schierwater. Global Diversity of the Placozoa. PLoS One 8, no. 4 (2013). P. e57131.

Stephen Jay Gould and Richard C. Lewontin. The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. Proceedings of the Royal Society of London. Ser. B, 205, no. 1161 (1979). P. 581–598.

Danielle A. Ludeman et al. Evolutionary Origins of Sensation in Metazoans: Functional Evidence for a New Sensory Organ in Sponges. BMC Evolutionary Biology 14, no. 1 (2014). P. 3.

Luiz Pessoa and Patrick R. Hof. From Paul Broca's Great Limbic Lobe to the Limbic System. Journal of Comparative Neurology 523, no. 17 (2015). P. 2495–2500.

Joshua R Sanes and S. Lawrence Zipursky. Design Principles of Insect and Vertebrate Visual Systems. Neuron 66, no. 1 (2010). P. 15–36.

3. Обезьяноункул

Хорошо с исторической точки зрения гомункул рассмотрен в ст.: Scott (1993), — а о гомункуле-женщине рассказано в: Di Noto et al. (2013). Исторический аспект рисунков гомункула, сделанных миссис Х.П. Кэнтли, разбирается в кн.: Griggs (1988). Прочитать об изучении крота-звездорыла можно в ст.: Catania (2012), — а вот ссылка для тех, кто хочет посмотреть, как этот крот добывает себе корм: <http://www.pnas.org/content/suppl/2012/06/20/1201885109.DCSupplemental/sm02.mov>. Тот же автор изучал и голых землекопов: Catania and Remple (2002). О зрении голых землекопов можно узнать из ст.: Kott et al. (2010). Исследования О'Лири опубликованы в ст.: Zembrzycki et al. (2013). Идея о «надсводных строениях», изложенная в этой

главе, взята в ст.: Gould and Lewontin (1979). Замечание Левенгука об омматидиях цитируется в ст.: Resh and Carde (2009). Лекцию Джессела о развитии глаз у циклопов можно посмотреть тут: <https://www.youtube.com/watch?v=ctCzreJqouA>.

Kenneth C. Catania. Evolution of Brains and Behavior for Optimal Foraging: A Tale of Two Predators. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109, suppl. 1 (2012). P. 10701–10708.

Kenneth C. Catania and *Michael S. Remple*. Somatosensory Cortex Dominated by the Representation of Teeth in the Naked Mole-Rat brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99, no. 8 (2002). P. 5692–5697.

Paula M. Di Noto, Leorra Newman, Shelley Wall, and Gillian Einstein. The Hermunculus: What Is Known about the Representation of the Female Body in the Brain? *Cerebral Cortex* 23, no. 5 (2013). P. 1005–1013.

Stephen Jay Gould and *Richard C. Lewontin*. The Spandrels of San Marco and the Panglossian Paradigm: A Critique of the Adaptationist Programme. *Proceedings of the Royal Society of London. Ser. B*, 205, no. 1161. P. 581–598.

Richard A. Griggs. Who Is Mrs. Cantlie and Why Are They Doing Those Terrible Things to Her Homunculi? *Teaching of Psychology* 15, no. 2 (1988). P. 105–106.

Ondrej Kott, Radim Sumbera and *Pavel Nemeč*. Light Perception in Two Strictly Subterranean Rodents: Life in the Dark or Blue? *PLoS One* 5, no. 7 (2010). P. e11810.

Vincent H. Resh and *Ring T. Carde* (eds.). *Encyclopedia of Insects*. Academic Press, 2009.

Geoffrey D. Schott. Penfeld's Homunculus: A Note on Cerebral Cartography. *Journal of Neurology, Neurosurgery and Psychiatry* 56, no. 4 (1993). P. 329–333.

Andreas Zembrzycki et al. Sensory Cortex Limits Cortical Maps and Drives Top-Down Plasticity in Thalamocortical Circuits. *Nature Neuroscience* 16, no. 8 (2013). P. 1060–1067.

4. Дело вкуса (и запаха)

Внутренние механизмы работы нейронов при восприятии вкуса рассмотрены в статье: Simon et al. (2016). Вкусовые рецепторы насекомых описаны в ст.: Isono and Morita (2010). Гены рецепторов горького вкуса у животных — основная тема работы Ли и Цанга: Li and Zhang (2014), — а об определенных вкусовых рецепторах читайте ст.: Feng et al. (2014). Обзор вкусовых рецепторов в целом есть в ст.: Wang and Zhao (2015), — а конкретно о вкусовых рецепторах пингвинов написано в ст.: Zhao et al. (2015). Работа органов обоняния у дрозофилы описана в ст.: Woodard et al. (1989). Обзор работы об органах обоняния животных, авторы которой получили Нобелевскую премию, содержится в ст.: Buck and Axel (1991). О количестве обонятельных рецепторов у животных можно почитать в ст.: Vandeweghe et al. (2016). Также я упоминал книгу о гусеницах: Fabre's (1919). В ст.: Bushdid et al. (2014) — рассказывается об огромном количестве запахов, которые мы потенциально можем различать.

Linda Buck and Richard Axel. A Novel Multigene Family May Encode Odorant Receptors: A Molecular Basis for Odor Recognition. *Cell* 65, no. 1 (1991). P. 175–187.

Caroline Bushdid, Marcelo O. Magnasco, Leslie B. Vosshall and Andreas Keller. Humans Can Discriminate More Than 1 Trillion Olfactory Stimuli. *Science* 343, no. 6177 (2014). P. 1370–1372.

Jean-Henri Fabre. The Life of the Caterpillar. Dodd, Mead, 1919.

Ping Feng et al. Massive Losses of Taste Receptor Genes in Toothed and Baleen Whales. *Genome Biology and Evolution* 6, no. 6 (2014). P. 1254–1265.

Kunio Isono and Hiromi Morita. Molecular and Cellular Designs of Insect Taste Receptor System. *Frontiers in Neuroscience* 4 (2010). P. 1–16.

Diyang Li and Jianzhi Zhang. Diet Shapes the Evolution of the Vertebrate Bitter Taste Receptor Gene Repertoire. *Molecular Biology and Evolution* 31, no. 2 (2014). P. 303–309.

Sidney A. Simon, Ivan E. de Araujo, Ranier Gutierrez and Miguel A. L. Nicolelis. The Neural Mechanisms of Gustation: A Distributed Processing Code. *Nature Reviews Neuroscience* 7, no. 11 (2006). P. 890–901.

Kai Wang and Huabin Zhao. Birds Generally Carry a Small Repertoire of Bitter Taste Receptor Genes. *Genome Biology and Evolution* 7, no. 9 (2015). P. 2705–2715.

Craig Woodard et al. Genetic Analysis of Olfactory Behavior in *Drosophila*: A New Screen Yields the *ota* Mutants. *Genetics* 123, no. 2. P. 315–326.

Michael W. Vandewege et al. Contrasting Patterns of Evolutionary Diversification in the Olfactory Repertoires of Reptile and Bird Genomes. *Genome Biology and Evolution* 8, no. 3 (2016). P. 470–480.

Huabin Zhao, Jianwen Li and Jianzhi Zhang. Molecular Evidence for the Loss of Three Basic Tastes in Penguins. *Current Biology* 25, no. 4 (2015). P. R141–R142.

5. Во все глаза (и уши)

Органы слуха у насекомых описаны в ст.: Gopfert and Hennig (2015). О том, что такое остаточное чувство равновесия у ленивцев, рассказывает ст.: Billet et al. (2012), — а обсуждение этого явления с Джерри Койном можно найти по ссылке: <https://whyevolutionistrue.com/2012/08/05/darwin-right-again-the-inner-ears-of-sloths-are-highly-variable>. Описание структуры внутреннего уха млекопитающих есть в ст.: Ekdale (2016), — а электрорецепция у яйцекладущих — в ст.: Schneider et al. (2016).

Guillaume Billet et al. High Morphological Variation of Vestibular System Accompanies Slow and Infrequent Locomotion in Three-Toed Sloths. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 279, no. 1744 (2012). P. 3932–3939.

Eric G. Ekdale. Form and Function of the Mammalian Inner Ear. *Journal of Anatomy* 228, no. 2 (2016). P. 324–337.

Martin C. Gopfert and R. Matthias Hennig. Hearing in Insects. *Annual Review of Entomology* 61 (2016). P. 257–276.

Eve R. Schneider, Elena O. Gracheva and Slav N. Bagriantsev. Evolutionary Specialization of Tactile Perception in Vertebrates. *Physiology* 31, no. 3 (2016). P. 193–200.

6. Супернюхачи и супердегустаторы

Об уникальной способности Джой Милн чувствовать запах болезни Паркинсона подробно написано в ст.: Morgan (2016). О том, как сниженное обоняние используют для диагностики болезни Альцгеймера, написано в статьях: Devanand et al. (2015); Growdon et al. (2015). Аргументы «за» и «против» вибрационной гипотезы представлены в ст.: Turin et al. (2015); Block et al. (2015). Сходство развития зубов и вкусовых сосочков освещено в ст.: Bloomquist et al. (2015). Великолепный обзор рецепторов TRP представлен в ст.: Cortright et al. (2007), — там же рассказывается о том, как с этими рецепторами связана боль. Связь гена SCN9A и отсутствия боли описана в ст.: Cox et al. (2006); Sawal et al. (2016). Выходки Кемре Кандара можно посмотреть по ссылке: <https://www.youtube.com/channel/UCTYPI3osBN9nGTSbYGM0rIQ>.

Eric Block et al. Implausibility of the Vibrational Theory of Olfaction. Proceedings of the National Academy of Sciences 112, no. 21 (2015). P. E2766–E2774.

Ryan F. Bloomquist et al. Coevolutionary Patterning of Teeth and Taste Buds. Proceedings of the National Academy of Sciences 112, no. 44 (2015). P. E5954–E5962.

Daniel N. Cortright, James E. Krause and Daniel C. Broom. TRP Channels and Pain. Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Basis of Disease 1772, no. 8 (2007). P. 978–988.

James J. Cox et al. An SCN9A Channelopathy Causes Congenital Inability to Experience Pain. Nature 444, no. 7121 (2006). P. 894–898.

D.P. Devanand et al. Olfactory Deficits Predict Cognitive Decline and Alzheimer Dementia in an Urban Community. Neurology 84, no. 2 (2015). P. 182–189.

Matthew E. Growdon et al. Odor Identification and Alzheimer Disease Biomarkers in Clinically Normal Elderly. Neurology 84, no. 21 (2015). P. 2153–2160.

Jules Morgan. Joy of Super Smeller: Sebum Clues for PD Diagnostics. Lancet Neurology 15, no. 2 (2016). P. 138.

H. A. Sawal et al. Biallelic Truncating SCN9A Mutation Identified in Four Families with Congenital Insensitivity to Pain from Pakistan. *Clinical Genetics* 90, no. 6 (2016). P. 563–565.

Luca Turin, Simon Gane, Dimitris Georganakis, Klio Maniati and Efthymios M. C. Skoulakis. Plausibility of the Vibrational Theory of Olfaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112, no. 25 (2015). P. E3154–E3154.

7. Где я?

Броуновское движение и его роль в равновесии рассмотрены в ст.: Muller et al. (2016). Почитать всестороннее обсуждение нарушений равновесия можно по ссылке: <https://www.nidcd.nih.gov/health/balance-disorders>. Подробное объяснение, почему комната вращается вокруг нас после того, как мы выпили, особенно если речь о вине, дано в кн.: Tattersall and DeSalle (2015).

Mees Muller, Kier Heeck and Coen P.H. Elemans. Semicircular Canals Circumvent Brownian Motion Overload of Mechanoreceptor Hair Cells. *PLoS One* 11, no. 7 (2016). P. e0159427.

Ian Tattersall and Rob DeSalle. *A Natural History of Wine.* Yale University Press, 2015.

8. Телячьи нежности

Многообразие клеток, проводящих осязательные ощущения через кожу, описано в ст.: Lumpkin et al. (2010); Connor (2006). Интервью с Дэвидом Линденом в 2015 году приведено в ст.: Gregoire (2015), — в этой же публикации есть обсуждение его работы. Обзор геномных исследований болезни Шарко — Мари — Тута дан в ст.: Lupski et al. (2013), — а о близнецовом методе изучения этого же синдрома рассказано в ст.: Frenzel et al. (2012). Кроме того, следует прочитать ст.: Pranav and Yang (2015), — авторы которой изучили синдром Ушера и связанные с ним фенотипы.

Steven Connor. The Menagerie of the Senses. *Senses and Society* 1, no. 1 (2006). P. 9–26.

Henning Frenzel et al. A Genetic Basis for Mechanosensory Traits in Humans. *PLoS Biol* 10, no. 5 (2012). P. e1001318.

Ellen A. Lumpkin, Kara L. Marshall and Aislyn M. Nelson. The Cell Biology of Touch. *Journal of Cell Biology* 191, no. 2 (2010). P. 237–248.

James R. Lupski et al. Exome Sequencing Resolves Apparent Incidental Findings and Reveals Further Complexity of SH3TC2 Variant Alleles Causing Charcot-Marie-Tooth Neuropathy. *Genome Medicine* 5, no. 6 (2013). P. 57.

Pranav Mathur and Jun Yang. Usher Syndrome: Hearing Loss, Retinal Degeneration and Associated Abnormalities. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) — Molecular Basis of Disease* 1852, no. 3 (2015). P. 406–420.

9. Глаза

Об остроте зрения бейсболистов можно прочесть в ст.: *Bahill et al.* (2005). Эволюция опсинов у позвоночных описана в ст.: *Shichida and Matsuyama* (2009); *Porter et al.* (2012), а у приматов — в ст.: *SurrIDGE et al.* (2003). Обзор нестандартных примеров цветового зрения вы найдете в ст.: *Marshall and Arikawa* (2014). Аномальная трихроматия рассмотрена в ст.: *Jordan et al.* (2010), — а тетрахроматия и художественные способности в ст.: *Jameson et al.* (2016). Об опсинах у неандертальцев читайте в ст.: *Taylor and Reimchen* (2016).

A. Terry Bahill, David G. Baldwin and Jayendran Venkateswaran. Predicting a Baseball's Path. *American Scientist* 93, no. 3 (2005). P. 218–225.

Kimberly A. Jameson, Alissa D. Winkler and Keith Goldfarb. Art, Interpersonal Comparisons of Color Experience, and Potential Tetrachromacy. *Electronic Imaging*, no. 16 (2016). P. 1–12.

Gabriele Jordan, Samir S. Deeb, Jenny M. Bosten and J.D. Mollon. The Dimensionality of Color Vision in Carriers of Anomalous Trichromacy. *Journal of Vision* 10, no. 8. P. 1–19.

Justin Marshall and Kentaro Arikawa. Unconventional Colour Vision. *Current Biology* 24, no. 24 (2014). P. R1150–R1154.

Megan L. Porter et al. Shedding New Light on Opsin Evolution. In *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, no. 1726 (2012). P. 3–14.

Yoshinori Shichida and Take Matsuyama. Evolution of Opsins and Phototransduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 364, no. 1531 (2009). P. 2881–2895.

Alison K. Surridge, Daniel Osorio and Nicholas I. Mundy. Evolution and Selection of Trichromatic Vision in Primates. *Trends in Ecology and Evolution* 18, no. 4 (2003). P. 198–205.

John S. Taylor and Thomas E. Reimchen. Opsin Gene Repertoires in Northern Archaic Hominids. *Genome* 59, no. 8 (2016). P. 541–549.

10. Всякое может случиться

Информация, представленная в начале этой главы, взята из классической книги Карла Сагана: Carl Sagan (1980) — и ст.: de Schotten et al. (2015), — посвященной визуальным исследованиям мозга. Авторы ст.: Schofeld et al. (2014); Frasnelli et al. (2016) — кратко сформулировали, как травмы головного мозга влияют на обоняние, а ст.: Худакис et al. (2015) — рассказывает о нарушениях обоняния и ЧМТ у служащих в американской армии. Кроме того, американские военнослужащие были предметом метаанализа работ о шуме в ушах и ЧМТ: Theodoroff et al. (2015). Обзор, посвященный влиянию звуков в повседневной жизни на слух, вы найдете в ст.: Gurevitch et al. (2014).

M. Thiebaut de Schotten et al. From Phineas Gage and Monsieur Leborgne to HM: Revisiting Disconnection Syndromes. *Cerebral Cortex* 25, no. 12 (2015). P. 4812–4827.

Howard Eichenbaum, Thomas H. Morton, Harry Potter and Suzanne Corkin. Selective Olfactory Deficits in Case HM. *Brain* 106, no. 2 (1983). P. 459–472.

J. Frasnelli et al. Olfactory Function in Acute Traumatic Brain Injury. *Clinical Neurology and Neurosurgery* 140 (2016). P. 68–72.

Boris Gourevitch, Jean-Marc Edeline, Florian Occelli and Jos J. Eggermont. Is the Din Really Harmless? Long-Term Effects of Non-Traumatic Noise on the Adult Auditory System. *Nature Reviews Neuroscience* 15, no. 7 (2014). P. 483–491.

Arnaud J. Norena and Jos J. Eggermont. Enriched Acoustic Environment after Noise Trauma Abolishes Neural Signs of Tinnitus. *Neuroreport* 17, no. 6 (2006). P. 559–563.

Carl Sagan. Broca's Brain: Reflections on the Romance of Science. Presidio Press, 1980.

Peter William Schofeld, Tammie Maree Moore and Andrew Gardner. Traumatic Brain Injury and Olfaction: A Systematic Review. *Frontiers in Neurology* 5 (2014). P. 5.

Sarah M. Theodoroff et al. Hearing Impairment and Tinnitus: Prevalence, Risk Factors, and Outcomes in US Service Members and Veterans Deployed to the Iraq and Afghanistan Wars. *Epidemiologic Reviews* 37, no. 1 (2015). P. 71–85.

Michael S. Xydakis et al. Olfactory Impairment and Traumatic Brain Injury in Blast-Injured Combat Troops A Cohort Study. *Neurology* 84, no. 15 (2015). P. 1559–1567.

11. Современная жизнь: апоплексические удары и чувства

О том, что такое Лэkv (Leq), подробно рассказано в ст.: Gourevitch et al. (2014), — кроме того, именно на основе этой публикации сделан рис. 11.1. Возможности обогащенной акустической среды для снижения уровня шума в ушах описаны в ст.: Norena et al. (2006).

Boris Gourevitch, Jean-Marc Edeline, Florian Occelli and Jos J. Eggermont. Is the Din Really Harmless? Long-Term Effects of Non-Traumatic Noise on the Adult Auditory System. *Nature Reviews Neuroscience* 15, no. 7 (2014). P. 483–491.

Arnaud J. Norena and Jos J. Eggermont. Enriched Acoustic Environment after Noise Trauma Abolishes Neural Signs of Tinnitus. *Neuroreport* 17, no. 6 (2006). P. 559–563.

12. Мозг: целый/половинчатый/ расщепленный

Долгосрочные результаты гемисферэктомии у детей описаны в ст.: Moosa et al. (2013). Интервью с Джеком и Байроном можно посмотреть по ссылкам: https://www.youtube.com/watch?v=f2IiMEbMnPM&list=PLtUz1usdFE0uU_PwD1WNsE0uO6NJIvOg и <https://www.youtube.com/watch?v=3oef68YabD0>. Прекрасный обзор исследований расщепленного мозга сделан в ст.: Gazzaniga (2005). О разнице образования нейронных путей у мужчин и женщин можно прочитать в ст.: Ingalhalikar et al. (2014). Эксперименты «Я или Майк?» описаны в ст.: Turk et al. (2002). О синдроме Капгра читайте в ст.: Hirstein and Ramachandran (2001). Про агенезию мозолистого тела (AgCC) и ее влияние на язык написано в ст.: Owen et al. (2013); Hinkley et al. (2013). Видео с Кимом Пиком можно посмотреть по ссылке: <https://www.youtube.com/watch?v=k2T45r5G3kA>.

Michael S. Gazzaniga. Forty-Five Years of Split-Brain Research and Still Going Strong. *Nature Reviews Neuroscience* 6, no. 8 (2005). P. 653–659.

Leighton B. N. Hinkley et al. The Contribution of the Corpus Callosum to Language Lateralization. *Journal of Neuroscience* 36, no. 16 (2016). P. 4522–4533.

William Hirstein and Vilayanur S. Ramachandran. Capgras Syndrome: A Novel Probe for Understanding the Neural Representation of the Identity and Familiarity of Person. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 264, no. 1380 (1997). P. 437–444.

Madhura Ingalhalikar et al. Sex Differences in the Structural Connectome of the Human Brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111, no. 2 (2014). P. 823–828.

Ahsan N. V. Moosa et al. Long-Term Functional Outcomes and Their Predictors after Hemispherectomy in 115 Children. *Epilepsia* 54, no. 10 (2013). P. 1771–1779.

Julia P. Owen et al. The Structural Connectome of the Human Brain in Agenesis of the Corpus Callosum. *Neuroimage* 70 (2013). P. 340–355.

David J. Turk et al. Mike or Me? Self-Recognition in a Split-Brain Patient. *Nature Neuroscience* 5, no. 9 (2002). P. 841–842.

13. «Команда соперников» против «его несовершенства»

Книги Маркуса и Иглмена, упомянутые в этой главе, есть в списке ниже. Обзор экспериментов Клувера и Бьюси вы найдете в ст.: Kluver and Bucy (1939).

David Eagleman. *Incognito.* Robert Laffont, 2013.

Heinrich Kluver and Paul C. Bucy. Preliminary Analysis of Functions of the Temporal Lobes in Monkeys. *Archives of Neurology and Psychiatry* 42, no. 6 (1939). P. 979–1000.

Gary Marcus. *Kluge: The Naphazard Evolution of the Human Mind.* Houghton Mifflin Harcourt, 2009.

14. Нейронный мусор

Бинокулярное соревнование рассматривается в ст.: Levelt (1965), — слуховое соперничество в ст.: Deutsch (1974), — а соперничество органов обоняния в ст.: Zhou and Chen (2009). О тесте со стержнем и рамой, а также о разнице восприятия мужчинами и женщинами предметов в пространстве написано в ст.: Linn and Petersen (1985). О том, как появилась визуальная иллюзия со звуком, написано в ст.: Shams et al. (2002), — а как она работает, можно узнать из ст.: Cecere et al. (2015). Действие этой иллюзии и «байесовский мозг» обсуждаются в ст.: Kerlin and Shapiro (2015). Роль

блеска в зрительном восприятии рассматривается в работе: Adams et al. (2016).

Wendy J. Adams, Iona S. Kerrigan and Erich W. Graf. Touch Influences Perceived Gloss. Scientific Reports 6, 2016: doi:10.1038/srep21866.

Roberto Cecere, Geraint Rees and Vincenzo Romei. Individual Differences in Alpha Frequency Drive Crossmodal Illusory Perception. Current Biology 25, no. 2 (2015). P. 231–235.

Diana Deutsch. An Auditory Illusion. Journal of the Acoustical Society of America 55, no. S1 (1974). P. S18–S19.

Jess R. Kerlin and Kimron L. Shapiro. Multisensory Integration: How Sound Alters Sight. Current Biology 25, no. 2 (2015). P. R76–R77.

Willem J. M. Levelt. On Binocular Rivalry. PhD diss., Van Gorcum Assen, 1965.

Marcia C. Linn and Anne C. Petersen. Emergence and Characterization of Sex Differences in Spatial Ability: A Meta-Analysis. Child Development 56, no. 6 (1985). P. 1479–1498.

Ladan Shams, Yukiyasu Kamitani and Shinsuke Shimojo. Visual illusion induced by sound. Cognitive Brain Research 14, no. 1 (2002). P. 147–152.

Wen Zhou and Denise Chen. Binaral Rivalry between the Nostrils and in the Cortex. Current Biology 19, no. 18 (2009). P. 1561–1565.

15. Пани ка меуза, крем-брюле и синестезия

В этой главе обсуждаются несколько работ Чарльза Спенса и его коллег: Gallace et al. (2011), Ngo et al. (2011), Spence and Gallace (2011), Knoferle and Spence (2012), Carvalho et al. (2016) и Wang and Spence (2016). Научный сайт Шона Дея, посвященный синестезии, можно найти по ссылке: <http://www.daysyn.com/>. О синестезии и евгенике читайте в ст.: Fretwell (2011). Информацию о синестезии у близнецов читайте в ст.: Bosley and Eagleman (2015), — а о синестезии и исследованиях геномных ассоциаций в ст.: Graham et al. (2014). Метаанализ исследований визуализации сделан в ст.: Hupé and Dojat (2015). Исследование зеркальных нейронов описано в ст.: Ferrari et

al. (2003); Caggiano et al. (2009). О тактильной эмоциональной синестезии читайте ст.: Ramachandran and Brang (2009).

Hannah G. Bosley and David M. Eagleman. Synesthesia in Twins: Incomplete Concordance in Monozygotes Suggests Extragenic Factors. *Behavioural Brain Research* 286 (2015). P. 93–96.

Vittorio Caggiano et al. Mirror Neurons Differentially Encode the Peripersonal and Extrapersonal Space of Monkeys. *Science* 324, no. 5925 (2009). P. 403–406.

Felipe Reinoso Carvalho, Qian Janice Wang, Raymond Van Ee and Charles Spence. The Influence of Soundscapes on the Perception and Evaluation of Beers. *Food Quality and Preference* 52 (2016). P. 32–41.

Pier Francesco Ferrari, Vittorio Gallese, Giacomo Rizzolatti and Leonardo Fogassi. Mirror Neurons Responding to the Observation of Ingestive and Communicative Mouth Actions in the Monkey Ventral Premotor Cortex. *European Journal of Neuroscience* 17, no. 8 (2003). P. 1703–1714.

Erica Fretwell. Senses of Belonging: The Synaesthetics of Citizenship in American Literature, 1862–1903. PhD diss., Duke University, 2011.

Alberto Gallace, Erica Boschini and Charles Spence. On the taste of ‘Bouba’ and ‘Kiki’: An Exploration of Word-Food Associations in Neurologically Normal Participants. *Cognitive Neuroscience* 2, no. 1 (2011). P. 34–46.

Sarah A. Graham et al. Decoding the Genetics of Synaesthesia Using State-of-the-Art Genomics. Paper presented at symposium, Synaesthesia in Perspective: Development, Networks, and Multisensory Processing, Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf, February 28 — March 1, 2014.

Jean-Michel Hupe and Michel Dojat. A Critical Review of the Neuroimaging Literature on Synesthesia. *Frontiers in Human Neuroscience* 9 (2015). P. 103.

Klemens Knoferle and Charles Spence. Crossmodal Correspondences between Sounds and Tastes. *Psychonomic Bulletin and Review* 19, no. 6 (2012). P. 992–1006.

Mary Kim Ngo Reeva Misra and Charles Spence. Assessing the Shapes and Speech Sounds That People Associate with Chocolate Samples Varying in Cocoa Content. *Food Quality and Preference* 22, no. 6 (2011). P. 567–572.

Vilayanur S. Ramachandran and David Brang. Tactile-Emotion Synesthesia. *Neurocase* 14, no. 5 (2008). P. 390–399.

Charles Spence and Alberto Gallace. Tasting Shapes and Words. *Food Quality and Preference* 22, no. 3 (2011). P. 290–295.

Qian Janice Wang and Charles Spence. ‘Striking a Sour Note’: Assessing the Influence of Consonant and Dissonant Music on Taste Perception. *Multisensory Research* 29, no. 1–3 (2016). P. 195–208.

16. Коннектомы

Тесты на совмещение, выполняемые самкой морского льва по имени Рио, описаны в ст.: Schusterman and Kastak (1998), — а о том, как африканские львы узнают друг друга, читайте в ст.: Gilflan et al. (2016). О шимпанзе и их восприятии тона написано в ст.: Ludwig et al. (2011), — а результаты этого исследования изложены в ст.: Deroy and Spence (2013). Описание нейронных путей нематоды (*C. elegans*) дано в ст.: White et al. (1986), — а о коннектоме этой нематоды в ст.: Izquierdo and Beer (2016). Обзор сравнения коннектомов представлен в ст.: Van den Heuvel et al. (2016), — а обсуждение ДТМ и коннектомов приведено в ст.: Hecht et al. (2012).

Ophelia Deroy and Charles Spence. Training, Hypnosis, and Drugs: Artificial Synaesthesia, or Artificial Paradises? *Frontiers in Psychology* 4 (2013). P. doi:10.3389/fpsyg.2013.00660.

Geoffrey Gilflan, Jessica Vitale, John Weldon McNutt and Karen McComb. Cross-Modal Individual Recognition in Wild African Lions. *Biology Letters* 12, no. 8 (2016). P. 20160323.

Erin E. Hecht et al. Process versus Product in Social Learning: Comparative Diffusion Tensor Imaging of Neural Systems for Action Execution — Observation Matching in Macaques, Chimpanzees, and Humans. *Cerebral Cortex* 23, no. 5 (2012). P. 1014–1024.

Eduardo J. Izquierdo and Randall D. Beer. The Whole Worm: Brain-Body-Environment Models of *C. elegans*. *Current Opinion in Neurobiology* 40 (2016). P. 23–30.

Vera U. Ludwig, Ikuma Adachi and Tetsuro Matsuzawa. Visuoauditory Mappings between High Luminance and High Pitch Are Shared by Chimpanzees (*Pan troglodytes*) and Humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108, no. 51 (2011). P. 20661–20665.

Ronald J. Schusterman and David Kastak. Functional Equivalence in a California Sea Lion: Relevance to Animal Social and Communicative Interactions. *Animal Behaviour* 55, no. 5 (1998). P. 1087–1095.

Martijn P. Van den Heuvel, Edward T. Bullmore and Olaf Sporns. Comparative Connectomics. *Trends in Cognitive Sciences* 20, no. 5 (2016). P. 345–361.

John G. White, Eileen Southgate, J. Nichol Thomson and Sydney Brenner. The Structure of the Nervous System of the Nematode *Caenorhabditis elegans*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 314, no. 1165 (1986). P. 1–340.

17. Лица и галлюцинации

Как Тауберт и Парр использовали предметы Муни для изучения того, как шимпанзе распознают лица, читайте у авторов исследования в ст.: Taubert and Parr (2012). Упомянутые мной изображения собачьей задницы можно посмотреть по ссылке: http://dangerousminds.net/comments/jesus_christ_spotted_on_dogs_butt. О «шлеме Бога» написано в ст.: Biello (2007). Книга Оливера Сакса есть в списке литературы. Синдром Шарля Бонне подробно описан в ст.: ffytche (2005), — а обсуждение «таксономии» галлюцинационных явлений есть в ст.: ffytche (2013). Описание использования нейровизуализации для изучения галлюцинаций вы найдете в ст.: Allen et al. (2008). Почему нельзя пощекотать самого себя, написано в ст.: Blakemore et al. (2000), — а об исследовании людей под действием ЛСД с помощью фМРТ читайте в ст.: Carhart-Harris et al. (2016).

Paul Allen, Frank Laroi, Philip K. McGuire and Andre Aleman. The Hallucinating Brain: A Review of Structural and Functional Neuroimaging Studies of Hallucinations. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews* 32, no. 1 (2008). P. 175–191.

David Biello. Searching for God in the Brain. *Scientific American Mind* 18, no. 5 (2007). P. 38–45.

Sarah-Jayne Blakemore, Daniel Wolpert and Chris Frith. Why Can't You Tickle Yourself? *NeuroReport* 11 (2000). P. 11–16.

Carhart-Harris et al. Neural Correlates of the LSD Experience Revealed by Multimodal Neuroimaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113, no. 17 (2016). P. 4853–4858.

Dominic H. ffytche. Visual Hallucinations and the Charles Bonnet Syndrome. *Current Psychiatry Reports* 7, no. 3 (2005). P. 168–179.

———. The Hallucinating Brain: Neurobiological Insights into the Nature of Hallucinations. In *Hallucination*, ed. Fiona Macpherson and Dimitris Platchias. MIT Press, 2013. P. 45–64.

Oliver Sacks. *Hallucinations*. Pan Macmillan, 2012.

Jessica Taubert and Lisa A. Parr. The Perception of Two-Tone Mooney Faces in Chimpanzees (*Pan troglodytes*). *Cognitive Neuroscience* 3, no. 1 (2012). P. 21–28.

18. Нобелевская премия Боба Дилана

Комплексный анализ отношений или филогенезиса языков представлен в ст.: *Dunn (2015)*. Эволюция мозга гоминидов описана в кн.: *DeSalle and Tattersall (2012)*. Воссоздание черепа младенца неандертальца описано в ст.: *Scott et al. (2014)*; *Hublin et al. (2015)*; *Gunz (2016)*. О слиянии и эволюции языков написано в ст.: *Bolhuis et al. (2014, 2015)*, — а критику этой идеи вы найдете в ст.: *Lieberman (2015)*. О том, как человек становился грамотным, читайте в ст.: *Dahaene et al. (2015)*. Предположение о том, что Пруст был нейробиологом, содержится в кн.: *Lehrer (2008)*.

Johan J. Bolhuis, Ian Tattersall, Noam Chomsky and Robert C. Berwick. How Could Language Have Evolved? PLoS Biol 12, no. 8 (2014). P. e1001934.

———. Language: UG or Not to Be, That Is the Question. PLoS Biol 13, no. 2 (2015). P. e1002063.

Stanislas Dehaene, Laurent Cohen, Jose Morais and Regine Kolinsky. Illiterate to Literate: Behavioural and Cerebral Changes Induced by Reading Acquisition. Nature Reviews Neuroscience 16, no. 4 (2015). P. 234–244.

Rob DeSalle and Ian Tattersall. The Brain: Big Bangs, Behaviors, and Beliefs. Yale University Press, 2012.

Michael Dunn. Language Phylogenies. In The Routledge Handbook of Historical Linguistics. Routledge, 2015. P. 190–211.

Philipp Gunz. Growing Up Fast, Maturing Slowly: The Evolution of a Uniquely Modern Human Pattern of Brain Development. In Developmental Approaches to Human Evolution, ed. Julia C. Boughner and Campbell Rolian. John Wiley and Sons, 2016. P. 261–283.

Jean-Jacques Hublin, Simon Neubauer and Philipp Gunz. Brain Ontogeny and Life History in Pleistocene Hominins. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 370, no. 1663 (2015). P. 20140062.

Jonah Lehrer. Proust Was a Neuroscientist. Houghton Mifflin Harcourt, 2008.

Philip Lieberman. Language Did Not Spring Forth 100,000 Years Ago. PLoS Biol 13, no. 2 (2015). P. e1002064.

Nadia Scott, Simon Neubauer, Jean-Jacques Hublin and Philipp Gunz. A Shared Pattern of Postnatal Endocranial Development in Extant Hominoids. Evolutionary Biology 41, no. 4 (2014). P. 572–594.

19. Лицом к лицу с музыкой

Замечание Пинкера о чизкейке есть в его работе: Pinker (1999), — а о «мозговом черве» Сакса читайте в кн.: Sacks (2010). Обзор исследования о том, как нейроны связаны с абсолютным слухом, дан в ст.: Hou et al. (2016), — а генетические предпосылки музыкаль-

ного слуха описаны в ст.: Seesjarvi et al. (2016). Нейробиология музыки рассматривается в ст.: Chanda and Levitin (2013), — а нейробиология амузии в ст.: Peretz (2016). О геномных исследованиях музыкальности написано в работе: Oikkonen et al. (2016), — а также в ст.: Oikkonen and Jarvela (2014); Tan et al. (2014); Gingras et al. (2015). О том, как музыка связана с обществом, читайте в ст.: Bonneville-Roussey et al. (2013); TerBogt et al. (2013); Clark et al. (2015); Pantev et al. (2015); Savage (2015); Shafer et al. (2015); Shafer (2016). Роль музыки для снижения уровня стресса описана в ст.: Thoma et al. (2013), — а эксперимент с Мистером Боллом и связью музыки и эмоций разобран в ст.: Sievers et al. (2013). Статья Патрика Каваны об искусстве и нейробиологии также есть в списке литературы. Подход Рамачандрана к искусству представлен в ст.: Huang (2009). Описание программы Painting Fool вы найдете в кн.: Colton (2012), — а о возможностях программы генерировать галлюциногенное искусство можно прочитать в ст.: Berov and Khunberger (2016).

Leonid Berov and Kai-Uwe Kuhnberger. Visual Hallucination for Computational Creation. In Proceedings of the Seventh International Conference on Computational Creativity (2016). P. 107–114.

Arielle Bonneville-Roussy, Peter J. Rentfrow, Man K. Xu and Jeff Potter. Music through the Ages: Trends in Musical Engagement and Preferences from Adolescence through Middle Adulthood. *Journal of Personality and Social Psychology* 105, no. 4 (2013). P. 703.

Patrick Cavanagh. The Artist as Neuroscientist. *Nature* 434, no. 7031 (2005). P. 301–307.

Mona Lisa Chanda and Daniel J. Levitin. The Neurochemistry of Music. *Trends in Cognitive Sciences* 17, no. 4 (2013). P. 179–193.

Shannon Scott Clark and S. Giac Giacomantonio. Toward Predicting Prosocial Behavior: Music Preference and Empathy Differences between Adolescents and Adults. *Empirical Musicology Review* 10, no. 1–2 (2015). P. 50–65.

Simon Colton. The Painting Fool: Stories from Building an Automated Painter. In *Computers and Creativity*. Springer, 2012. P. 3–38.

Bruno Gingras et al. Defining the Biological Bases of Individual Differences in Musicality. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 370, no. 1664 (2015). P. 20140092.

Jiancheng Hou et al. Neural Correlates of Absolute Pitch: A Review. *Musicae Scientia* (2016), doi: 10.1177/10298649166662903.

Mengfei Huang. The Neuroscience of Art. *Stanford Journal of Neuroscience* 2, no. 1 (2009). P. 24–26.

Jaana Oikkonen and Irma Jarvela. Genomics Approaches to Study Musical Aptitude. *Bioessays* 36, no. 11 (2014). P. 1102–1108.

Jaana Oikkonen, Paivi Onkamo, Irma Jarvela and Chakravarthi Kanduri. Convergent Evidence for the Molecular Basis of Musical Traits. *Scientific Reports* 6 (2016). P. 39707.

Christo Pantev et al. Musical Expertise Is Related to Neuroplastic Changes of Multisensory Nature within the Auditory Cortex. *European Journal of Neuroscience* 41, no. 5 (2015). P. 709–717.

Isabelle Peretz. Neurobiology of Congenital Amusia. *Trends in Cognitive Sciences* 20, no. 11 (2016). P. 857–867.

Steven Pinker. How the Mind Works. *Annals of the New York Academy of Sciences* 882, no. 1 (1999). P. 119–127.

Oliver Sacks. *Musicophilia: Tales of Music and the Brain.* Vintage, 2010.

Patrick E. Savage, Steven Brown, Emi Sakai and Thomas E. Currie. Statistical Universals Reveal the Structures and Functions of Human Music. 2015.

Proceedings of the National Academy of Sciences 112, no. 29. P. 8987–8992.

Thomas Schafer. The Goals and Effects of Music Listening and Their Relationship to the Strength of Music Preference. *PloS One* 11, no. 3 (2016). P. e0151634.

Thomas Schafer, Peter Sedlmeier, Christine Stadler and David Huron. The Psychological Functions of Music Listening. *Frontiers in Psychology* 4 (2013). P. 511.

Erik Seesjarvi et al. The Nature and Nurture of Melody: A Twin Study of Musical Pitch and Rhythm Perception. *Behavior Genetics* 46, no. 4 (2016). P. 506–515.

Beau Sievers, Larry Polansky, Michael Casey and Thalia Wheatley. Music and Movement Share a Dynamic Structure That Supports Universal Expressions of Emotion. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110, no. 1 (2013). P. 70–75.

Yi Ting Tan, Gary E. McPherson, Isabelle Peretz, Samuel F. Berkovic and Sarah J. Wilson. The Genetic Basis of Music Ability. *Frontiers in Psychology* 5 (2014). P. 658.

Tom F.M. Ter Bogt, Loes Keijsers and Wim H.J. Meeus. Early Adolescent Music Preferences and Minor Delinquency. *Pediatrics* 131, no. 2 (2013). P. e380–e389.

Myriam V. Thoma et al. The Effect of Music on the Human Stress Response. *PloS One* 8, no. 8 (2013). P. e70156.

20. Нет пределов

Исследование разницы чтения на компьютерном экране и на бумаге было сделано и описано в ст.: Mangan et al. (2013). Подробности о феномене переноса игры читайте в ст.: Ortiz De Gortari (2016). Влияние на тактильные и сенсорные аспекты восприятия и гомункулярная гибкость в мире виртуальной реальности представлены в ст.: Won et al. (2015). Мы с коллегой обсуждаем взгляды Антонио Дамасио на эмоции в ст.: DeSalle and Tattersall (2012), — а рассуждения о роли языка в формировании когнитивных способностей человека вы найдете в ст.: Tattersall (2016).

Rob DeSalle and Ian Tattersall. *The Brain: Big Bangs, Behaviors, and Beliefs.* Yale University Press, 2012.

Anne Mangan, Bente R. Walgermo and Kolbjorn Bronnack. Reading Linear Texts on Paper versus Computer Screen: Effects on Reading Comprehension. *International Journal of Educational Research* 58 (2013). P. 61–68.

Angelica B. Ortiz De Gortari. The Game Transfer Phenomena Framework: Investigating Altered Perceptions, Automatic Mental Processes and Behaviors Induced by Virtual Immersion. *Annual Review of Cybertherapy and Telemedicine* 14 (2016). P. 9–15.

Ian Tattersall. The Thinking Primate: Establishing a Context for the Emergence of Modern Human Cognition. *Proceedings of the American Philosophical Society* 160, no. 3 (2016). P. 254–265.

Andrea Stevenson Won, Jeremy Bailenson, Jimmy Lee and Jaron Lanier. Homuncular Flexibility in Virtual Reality. *Journal of Computer-Mediated Communication* 20, no. 3 (2015). P. 241–259.

Научно-популярное издание

Десалл Роб

ЧУВСТВА

Нейробиология сенсорного восприятия

Ответственный редактор *А. Захарова*

Редактор *О. Форофонова*

Художественный редактор *М. Левыкин*

Технический редактор *Л. Симицына*

Корректоры *Е. Туманова, О. Левина*

Верстка *А. Тарасова*

ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» —

обладатель товарного знака «КоЛибри»

115093, Москва, ул. Павловская, д. 7, эт. 2, пом. III, ком. № 1

Тел. (495) 933-76-01, факс (495) 933-76-19

E-mail: sales@atticus-group.ru

Филиал ООО «Издательская Группа «Азбука-Аттикус» в г. Санкт-Петербурге

191123, Санкт-Петербург, Воскресенская набережная, д. 12, лит. А

Тел. (812) 327-04-55

E-mail: trade@azbooka.spb.ru

ЧП «Издательство «Махаон-Украина»

Тел./факс (044) 490-99-01

e-mail: sale@machaon.kiev.ua

www.azbooka.ru; www.atticus-group.ru

Знак информационной продукции
(Федеральный закон № 436-ФЗ от 29.12.2010 г.)

18+

Подписано в печать 14.04.2021. Формат 60×90 $\frac{1}{16}$.

Бумага офсетная. Гарнитура «Caslon BT».

Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,0.

Тираж 3000 экз. В-SCI-25006-01-R. Заказ № .

Отпечатано в соответствии с предоставленными материалами

в ООО «ИПК Парето-Принт». 170546, Тверская область,

Промышленная зона Боровлево-1, комплекс № 3А

www.pareto-print.ru