

под редакцией
ДЭВИДА Дж. ЛИНДЕНА

МОЗГОВОЙ ТРЕСТ

40 ВЕДУЩИХ НЕЙРОБИОЛОГОВ —
О ТОМ, ЧТО МЫ ЗНАЕМ
И ЧЕГО НЕ ЗНАЕМ
О МОЗГЕ

Сборник статей

**Мозговой трест. 40 ведущих
нейробиологов – о том, что мы
знаем и чего не знаем о мозге**

Издательство «Синдбад»

2018

Сборник статей

Мозговой трест. 40 ведущих нейробиологов – о том, что мы знаем и чего не знаем о мозге / Сборник статей — Издательство «Синдбад», 2018

ISBN 978-5-00131-420-2

Профессор Дэвид Линден собрал ответы сорока ведущих нейробиологов на вопрос: «Что бы вы больше всего хотели рассказать людям о работе мозга?» Так родился этот сборник научно-популярных эссе, расширяющий представление о человеческом мозге и его возможностях. В нем специалисты по человеческому поведению, молекулярной генетике, эволюционной биологии и сравнительной анатомии освещают самые разные темы. Почему время в нашем восприятии то летит незаметно, то тянется бесконечно долго? Почему, управляя автомобилем, мы ощущаем его частью своего тела? Почему дети осваивают многие навыки быстрее взрослых? Что творится в голове у подростка? Какой механизм отвечает за нашу интуицию? Способны ли мы читать чужие мысли? Как биологические факторы влияют на сексуальную ориентацию? Как меняется мозг под воздействием наркотиков? Как помочь мозгу восстановиться после инсульта? Наконец, возможно ли когда-нибудь создать искусственный мозг, подобный человеческому? Авторы описывают самые удивительные особенности мозга, честно объясняя, что известно, а что пока неизвестно ученым о работе нервной системы. Книга увлечет всех, кто интересуется наукой о мозге.

ISBN 978-5-00131-420-2

© Сборник статей, 2018
© Издательство «Синдбад», 2018

Содержание

Предисловие	7
Введение	8
Наука – развивающийся процесс, а не набор догм	14
Развитие и изменение	19
Генетика проливает свет на природу индивидуальности	19
Мозг состоит из миллиардов нейронов, но связи между ними могут формироваться по очень простым правилам	24
С момента рождения наше восприятие мира формируется в процессе постоянного разговора мозга с самим собой	29
Конец ознакомительного фрагмента.	30

Дэвид Линден

Мозговой трест. 40 ведущих нейробиологов – о том, что мы знаем и чего не знаем о мозге

Copyright © 2018, David J. Linden

Published in the Russian language by arrangement with *The Wylie Agency*

Russian Edition Copyright © Sindbad Publishers Ltd., 2020

Правовую поддержку издательства обеспечивает юридическая фирма «Корпус Права»

© Издание на русском языке, перевод на русский язык, оформление. Издательство «Синдбад», 2021

* * *

Можно ли читать чужие мысли?

Почему время то летит незаметно, то тянется бесконечно долго?

Почему дети осваивают многие навыки быстрее взрослых?

Почему, управляя автомобилем, мы ощущаем его частью своего тела?

Как меняется мозг под воздействием наркотиков?

Возможно ли создать искусственный мозг, подобный человеческому?

Ведущие нейробиологи отвечают на эти и многие другие вопросы, расширяя границы нашего представления о человеческом мозге и его возможностях.

Предисловие

Рассказывая о своей работе, ученые часто впадают в занудство. Вот почему я люблю подпаивать моих коллег-нейробиологов. На протяжении многих лет я угощал исследователей мозга выпивкой, после чего задавал им один и тот же вопрос: «Что бы вы больше всего хотели рассказать людям о работе мозга?» И наслаждался их ответами. Ученые не погружались в подробности своих последних экспериментов и не переходили на профессиональный жаргон. Они лишь немного расправляли плечи, чуть шире открывали глаза и давали ясные, глубокие и зачастую непредсказуемые или парадоксальные ответы.

Эта книга – во многом результат тех бесед. Я собрал «команду мечты» из самых известных в мире нейробиологов – серьезных, эрудированных и ясно мыслящих исследователей – и попросил их ответить на тот важный вопрос в жанре короткого эссе. Конечно, я обращался к специалистам с разным опытом, однако у меня не было цели создать краткий учебник по нейробиологии – неформальный, но всеобъемлющий. Я просто предложил ученым с самыми разными интересами самостоятельно выбрать тему и рассказать ту научную историю, которой они хотели бы поделиться.

Стоит признать: большинство книг о мозге написаны не исследователями мозга и не слишком хороши. Многие скучны, а те, которые можно читать, нередко содержат непроверенную или даже ложную информацию. Наш век – это век мозга, но думающие люди проявляют вполне оправданный скепсис, попадая под мощный поток псевдонаучной ахинеи («созерцание синего цвета улучшает творческие способности» или «существуют различия в строении мозга республиканцев и демократов»). Я уверен, что читателю нужны надежные и убедительные данные о биологической основе человеческого опыта. Люди хотят знать, что нам точно известно о работе мозга, что мы предполагаем, но не можем доказать, а что остается тайной. И они хотят верить тому, что читают.

Эта книга призвана не опровергнуть псевдонаучные тезисы, а честно и достоверно рассказать о том, что мы знаем о биологической основе наших повседневных переживаний, а также дать некоторые прогнозы относительно понимания работы нервной системы, лечения ее заболеваний и ее взаимодействия с электронными устройствами. Мы рассмотрим генетическую основу личности, механизмы эстетического восприятия, опишем природу сильной бессознательной потребности в любви, сексе, пище и наркотиках. Мы отыщем истоки человеческой индивидуальности, эмпатии и памяти. Иными словами, мы постараемся показать биологическую основу психической и социальной жизни человека, а также ее взаимосвязь с индивидуальным опытом, культурой и эволюцией. И мы честно расскажем, что знаем, а чего не знаем.

Дэвид Линден

Введение

Человеческий мозг не был создан гениальным изобретателем с чистого листа

Дэвид Линден

ЗДЕСЬ Я ПОПЫТАЛСЯ привести основные понятия клеточной нейробиологии, чтобы предложить вам что-то вроде небольшой порции сборной солянки. Если вы изучали нейробиологию или любите читать о том, как устроен мозг, то наверняка уже знакомы с большей частью этого материала. И я не обижусь, если вы пропустите первое блюдо. Но если эта область для вас новая или вы хотите освежить свои знания, данный раздел поможет вам погрузиться в тему и упростит понимание следующих эссе.

* * *

Около 550 миллионов лет назад быть животным было просто. Например, вы могли быть морской губкой, прикрепленной к камню, и шевелить крошечными жгутиками, прогоняя воду через свое тело, чтобы получить кислород и выловить бактерии и другие микроскопические частицы пищи. У вас были специализированные клетки, которые позволяли отдельным частям вашего тела медленно сокращаться, регулируя поток воды, но вы не могли свободно перемещаться по морскому дну. Или вы могли быть странным примитивным животным из числа пластинчатых, похожим на микроскопический блинчик: плоским многоклеточным диском диаметром около двух миллиметров с ресничками снизу, как у перевернутого ковра. Эти реснички позволяли вам медленно перемещаться по морскому дну в поисках скопления бактерий, которые служили вам пищей. Обнаружив особенно вкусную группу бактерий, вы охватывали ее своим телом со всех сторон и выделяли в этот импровизированный мешочек пищеварительные ферменты, ускоряющие усвоение питательных веществ. Переварив пищу, вы распрямлялись и продолжали медленно ползти по дну с помощью ресничек. Примечательно, что и губки, и пластинчатые умеют решать полезные задачи всех типов – чувствовать окружающую обстановку и реагировать на нее, находить пищу, медленно передвигаться, а также размножаться, причем для всего этого им не нужен мозг и специализированные клетки, которые называются нейронами и служат главным строительным материалом для мозга и нервов.

Нейроны удивительны. Они обладают уникальными свойствами, которые позволяют им быстро получать, обрабатывать и посылать электрические сигналы другим нейронам, мышцам или железам. Считается, что нейроны появились около 540 миллионов лет назад у животных, похожих на современных медуз. Мы не можем точно назвать причину их появления, но знаем, что они сформировались примерно в то время, когда животные начали поедать друг друга – с погонями и бегством, неизбежными для этого процесса. Таким образом, логично предположить, что появление нейронов ускорило и восприятие, и движение животных, что оказалось очень полезным, когда жизнь превратилась в состязание «кто кого съест».

* * *

Нейроны бывают самых разных форм и размеров, но в их структуре есть много общего. Как и все животные клетки, нейрон окружен тонкой внешней мембраной. Нейрон обладает клеточным телом, содержащим клеточное ядро, в котором хранится генетическая информация, зашифрованная в ДНК. Клеточное тело может иметь треугольную, круглую и овальную

форму, а его размер варьируется от 4 до 30 микрон в диаметре. Этот размер проще представить так: три клеточных тела, уложенные рядом, по толщине будут сравнимы с человеческим волосом. От клеточного тела отходят тонкие отростки, которые называются дендритами. Именно через них нейрон получает большинство химических сигналов от других нейронов. Дендриты могут быть короткими и длинными, веретенообразными и разветвленными – а у некоторых нейронов их вообще нет. Одни дендриты гладкие, другие покрыты крошечными выростами – дендритными шипиками. У большинства нейронов есть по меньшей мере несколько разветвленных дендритов, а также один длинный тонкий отросток, отходящий от тела клетки. Он называется аксоном и отвечает за передачу информации от нейрона.

Хотя от клеточного тела отходит лишь один аксон, далее он нередко разветвляется, и эти ветви могут расти в разных направлениях. Аксон может быть очень длинным. Например, некоторые аксоны тянутся от пальцев ноги человека до верхней части спинного мозга.

Информация от аксона одного нейрона к дендриту другого передается через особые места контактов, которые называются синапсами. В синапсах кончики аксонов одного нейрона подходят очень близко к другому нейрону, но не касаются его (рис. 1). Терминали аксона содержат множество крошечных пузырьков, сформированных из мембраны. В каждом из этих пузырьков, или синаптических везикул, содержится около 1000 молекул особого вещества – нейромедиатора. Терминаль аксона одного нейрона и дендрит другого разделяет синаптическая щель – узкий промежуток, заполненный солоноватой жидкостью, близкой по составу к плазме крови. В среднем у каждого нейрона около 5000 синапсов, преимущественно на дендритах; некоторое количество синапсов образуется на теле клетки и еще несколько – на аксоне. Если умножить 5000 синапсов в нейроне на 100 миллиардов нейронов в человеческом мозге, получится просто невероятное число: 500 триллионов. Представить это число можно так: если распределить синапсы мозга одного человека между всеми живущими на Земле людьми (на 2017 год), то каждому достанется по 64 000 штук.

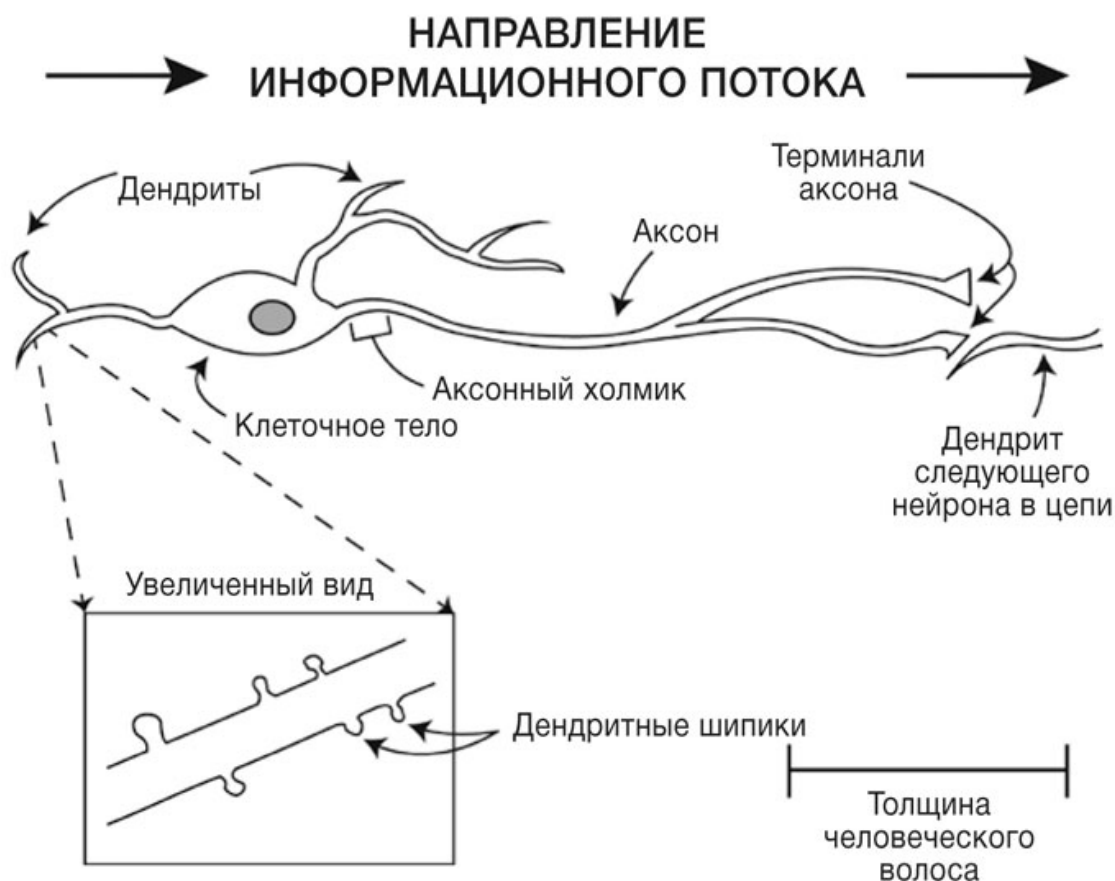


РИС. 1. Строение обычного нейрона и направление потока электрических сигналов от одного нейрона к другому

Синапсы представляют собой точки переключения между двумя типами быстрой передачи сигналов в мозге: электрическими импульсами и выделением и дальнейшим действием нейромедиаторов. Элементарная единица передачи электрического сигнала в мозге – нервный импульс (или *спайк*). Нервные импульсы – это короткие и мощные всплески электрической активности длительностью от одной до двух миллисекунд. Они возникают в месте соединения клеточного тела и аксона, в так называемом аксонном холмике. Мозг окружен особым солевым раствором, или спинномозговой жидкостью, с высокой концентрацией натрия и гораздо меньшей концентрацией калия. Атомы натрия и калия находятся в ней в виде положительно заряженных ионов. Концентрация ионов натрия по разные стороны мембраны нейрона значительно различается: снаружи она почти в 15 раз выше, чем внутри. Концентрация ионов калия, напротив, внутри почти в 15 раз выше, чем снаружи. Это соотношение необходимо для передачи электрических сигналов в мозге. В такой среде образуется потенциальная энергия – подобно той, которая накапливается, когда мы заводим пружину в детской игрушке. При определенных условиях эта энергия может высвободиться, генерируя электрические сигналы в нейронах. За электрический потенциал нейрона отвечает его внешняя мембрана: внутри клетки отрицательный заряд больше, чем снаружи. При возникновении нервного импульса содержащиеся во внешней мембране специализированные белки тороидальной формы, которые называются натриевыми каналами, открывают свои ранее закрытые отверстия в центре и впускают внутрь ионы натрия. Приблизительно через миллисекунду открываются другие ионные каналы, пропускающие ионы калия, которые устремляются наружу, что приводит к завершению нервного импульса.

Нервные импульсы движутся по аксону до терминалей, где запускают цепочку химических реакций. Эти химические реакции заставляют синаптические везикулы сливаться с внешней мембраной терминали аксона и высвобождать свое содержимое, в том числе молекулы нейромедиатора, в синаптическую щель. Молекулы нейромедиатора распространяются по узкому промежутку синаптической щели и связываются с рецепторами нейромедиатора во внешней мембране следующего нейрона сигнальной цепи. Одна из разновидностей рецепторов нейромедиатора (получившая название ионотропных рецепторов) напоминает бублик с закрытым отверстием, которое открывается только тогда, когда рецептор связывается с нейромедиатором. Когда ионный канал в таком рецепторе позволяет положительно заряженным ионам проникать внутрь клетки, принимающий нейрон возбуждается. И наоборот: если открытый нейромедиатором ионный канал выпускает положительно заряженные ионы наружу (или пропускает внутрь отрицательно заряженные ионы, например хлора), это блокирует возникновение нервного импульса в принимающем нейроне.

Электрические сигналы от активированных рецепторов в синапсах всего дендрита и тела клетки поступают в аксонный холмик. Если от синапсов одновременно приходит достаточное количество возбуждающих электрических сигналов и они не подавляются блокирующими сигналами, то в аксонном холмике возникает новый нервный импульс и сигнал передается далее по аксону принявшего его нейрона. Большинство психоактивных веществ, которые мы употребляем – как для лечения, так и для расслабления, – воздействуют на синапсы. Например, седативный препарат ксанакс и аналогичные химические соединения активизируют ингибиторные синапсы и тем самым снижают общую частоту генерации нервных импульсов в определенных отделах мозга.

По биологическим меркам передачу электрических сигналов в мозге можно назвать быстрой (она занимает миллисекунды), но ее скорость примерно в миллион раз меньше той, с которой передаются электрические сигналы в вашем ноутбуке или смартфоне. Важно понимать, что не все сигналы в синапсах передаются быстро. Кроме ионотропных рецепторов нейромедиаторов, срабатывающих за несколько миллисекунд, у нейрона имеется группа гораздо более медленных рецепторов, которые называются метаботропными. У этих рецепторов нет отверстия ионного канала; они либо запускают, либо блокируют химические реакции в принимающем нейроне, а время их срабатывания исчисляется секундами или даже минутами. Ионотропные рецепторы полезны для быстрой передачи сигналов: например, зрительной информации от сетчатки глаза к мозгу или команды от мозга к мышцам совершить нужное движение. В отличие от них медленные метаботропные рецепторы, которые реагируют на нейромедиаторы, в том числе на серотонин и дофамин, часто участвуют в регулировании общего психического состояния, в частности внимания, настроения или полового возбуждения.

* * *

Один нейрон сам по себе почти бесполезен, но группы взаимосвязанных нейронов выполняют важные задачи. Медуза обладает простыми сетями взаимосвязанных нейронов, которые позволяют ей совершать плавательные движения, реагируя на прикосновение, наклон тела, запах пищи и другие ощущения. У червей и улиток клеточные тела нейронов объединены в группы, которые называются ганглиями, и эти ганглии связаны между собой нервными волокнами, состоящими из множества аксонов. У омаров, насекомых и осьминогов ганглии соединяются, образуя примитивный мозг. Мозг осьминога состоит примерно из 500 миллионов нейронов – на первый взгляд, это очень много, но все же их в 200 раз меньше, чем в мозге человека. Тем не менее осьминог способен решать сложные когнитивные задачи. Например, он может наблюдать, как его сородич медленно учится открывать особый ящик, внутри которого спрятана еда, а затем применить полученные знания и с первого раза самостоятельно открыть

такой же ящик. В процессе эволюции позвоночных животных – от лягушки к мыши, от обезьяны к человеку – мозг увеличивался относительно размеров тела, а нейронных связей в нем становилось все больше; сильнее всего развилась его внешняя часть – новая кора головного мозга, или неокортекс.

Эволюция мозга или любой другой биологической структуры – это сложный процесс. Он происходит неравномерно, и на этом пути неизбежны тупики и ошибки. Но что важнее всего – у эволюции нет возможности начать все с начала и создать нечто совершенно новое. Человеческий мозг не был создан гениальным изобретателем с чистого листа. Он скорее представляет собой компиляцию из временных решений, которые накапливались и трансформировались с момента появления самого первого нейрона. И все же этот импровизированный винегрет способен творить настоящие чудеса.

Тезис о том, что человеческий мозг несовершенен, – не просто расхожая фраза; далекое от оптимального строение мозга серьезно влияет на саму основу человеческого опыта. Строение нейронов почти не изменилось с момента их возникновения, и у них есть серьезные недостатки. Они медленные, ненадежные и незащищенные. Для того чтобы из таких несовершенных деталей сложился человеческий интеллект, требуется огромный мозг с внутренними связями и с 500 триллионами синапсов. Он занимает много места – примерно 1200 см³. Такая большая голова не может пройти через родовые пути – а изменение тазовых костей ради более широких родовых путей негативно повлияло бы на способность к прямохождению. Эволюция сделала непростой выбор: человеческие детеныши рождаются с мозгом объемом 400 см³ (что сравнимо с объемом мозга взрослого шимпанзе). Но даже такие размеры мозга представляют проблему – голова ребенка с трудом проходит через родовые пути. (Смерть во время родов была довольно частым явлением на протяжении почти всей человеческой истории, но это редкость для других млекопитающих.) После рождения человека ждет необычайно долгое детство, в течение которого его мозг растет и развивается; этот процесс завершается только к 20 годам. На земле нет другого вида животных, чей восьмилетний детеныш не мог бы жить без родителей. Такое долгое детство накладывает отпечаток на многие аспекты социального поведения, в том числе на преобладающую систему брачных отношений с долговременным союзом, что очень редко встречается у млекопитающих. Иными словами, если бы в процессе эволюции строение нейронов изменилось на оптимальное, у нас, скорее всего, не существовало бы такого распространенного во всех культурах явления, как брак.

* * *

Каждый отдел мозга выполняет свои функции. Некоторые отделы отвечают за наши чувства, такие как зрение, вкус или осязание. Когда сенсорная информация поступает в мозг, она зачастую представляется в нем в виде карты: в зрительных зонах мозга имеется карта поля зрения, а в тех отделах, которые обрабатывают сигналы осязания, есть карта поверхности тела. Многие области мозга не выполняют какую-то одну функцию, например обработку зрительной информации. Они объединяют данные от разных органов чувств, отвечают за принятие решений и планирование действий. В конечном счете мозг предназначен для управления действиями, а для этого он посылает сигналы, которые вызывают сокращение или расслабление мышц или заставляют железы вырабатывать гормоны. Важно, что большую часть работы мозг выполняет автоматически: например, повышает кровяное давление, чтобы вы не упали в обморок, когда встаете со стула, или понижает температуру тела, когда вы спите. Эту произвольную регуляцию, как правило, осуществляют древние в эволюционном смысле структуры, расположенные в глубине мозга.

Нейроны мозга получают информацию от рецепторов, которые находятся в глазах, в ушах, на коже, в носу, на языке, а также в других местах. Более того, такая информация поступает не только от рецепторов, которые направлены наружу и реагируют на внешний мир, но и от тех, которые отслеживают процессы внутри тела (например, наклон головы, кровяное давление и уровень наполнения желудка). Нейроны мозга тесно взаимосвязаны. Критически важно, чтобы эта связь, которую обеспечивают аксоны, соединяющие разные участки, работала четко и бесперебойно: сигналы от сетчатки должны поступать в зоны, отвечающие за обработку зрительной информации, а команды от областей, связанных с движением, должны передаваться мышцам и т. д. Любые ошибки в работе мозга и даже самые незначительные нарушения нейронных связей могут привести к всевозможным неврологическим и психическим расстройствам.

Как же образуется эта сложная схема взаимосвязей в мозге? Она формируется под воздействием генетики и факторов внешней среды. Генетическая информация определяет общую структуру и связи в нервной системе. Но в большинстве участков мозга тонкая настройка нейронных структур происходит в результате локальных взаимодействий нейронов и под влиянием индивидуального опыта. Например, если глаза новорожденного ребенка оставить закрытыми, зрительные зоны его мозга не будут развиваться и человек останется слепым, даже если во взрослом возрасте ему откроют глаза. При формировании мозга – в период внутриутробного развития и в детстве – в нем образуется в два раза больше нейронов, чем используется в дальнейшем, а многие синапсы сначала появляются, а затем исчезают. Более того: те синапсы, которые сформировались и сохранились, могут быть сильнее или слабее – в зависимости от индивидуального опыта. Свойство мозга, благодаря которому на его формирование влияет жизненный опыт, называется нейропластичностью. Она играет важную роль в развитии мозга в детстве, но в некотором виде сохраняется и у взрослых. На протяжении всей жизни опыт, в том числе социальный, совершенствует структуру и функции нервной системы, создавая воспоминания и участвуя в формировании личности.

Наука – развивающийся процесс, а не набор догм

Уильям Кристан (младший), Кэтлин Френч

ШИРОКОЙ АУДИТОРИИ ОЧЕНЬ ТРУДНО ОБЪЯСНИТЬ, что такое «вера» в научную теорию. Отчасти это связано с тем, что в понятие «вера» люди вкладывают разный смысл. В повседневной жизни мы используем слово «верить» в самых разных контекстах:

Я верю, что скоро пойдет дождь.

Я верю своему ребенку, когда он говорит, что не употребляет наркотики.

Я верю, что подсудимый виновен.

Я верю, что кора головного мозга –местилище сознания.

Я верю, что А будет лучшим президентом, чем В.

Я верю в гравитацию.

Я верю в Бога.

В одних примерах «я верю» означает «я уверен», а в других – что-то вроде «по моему мнению» или «я предполагаю», как во фразе о возможном дожде. В каждом случае тот, кто верит, может действовать исходя из своего убеждения, и эти действия могут быть малозначимыми (когда вы берете с собой зонт, выходя из дома) или иметь далеко идущие последствия (когда вы строите свою жизнь, основываясь на религиозном учении). Где на этой шкале находится вера в научную теорию? Это трудный вопрос, потому что научные теории в своем развитии проходят несколько стадий, и на каждой из них критерии могут существенно разниться. Эти стадии существуют потому, что наука следует стратегии «предположение – проверка – интерпретация», и такая последовательность обычно повторяется многократно. Интересно, что и в повседневной жизни мы все действуем подобно ученым – по крайней мере, иногда.

Рассмотрим пример из жизни. Вы устраиваетесь в любимом кресле, чтобы почитать газету, щелкаете выключателем торшера, но свет не зажигается. Возможно, кто-то выдернул шнур из розетки (*предположение 1*). Вы смотрите на стену и видите, что вилка шнура в розетке (*проверка 1*), а значит, проблема в другом (*интерпретация 1*). Возможно, сработал предохранитель (вполне логичное *предположение 2*); однако телевизор, подключенный к той же электрической цепи, работает (*проверка 2*) – стало быть, дело не в предохранителе (*интерпретация 2*). Возможно, неисправна стенная розетка (*предположение 3*); вы включаете в нее другую лампу, и она зажигается (*проверка 3*). Значит, розетка исправна (*интерпретация 3*). Затем вы последовательно проверяете еще несколько предположений (не перегорела ли лампочка, не оборвался ли шнур) и, наконец, находите интерпретацию (неисправный выключатель), которая позволяет вам починить торшер. Все ваши предположения основываются на прежнем опыте обращения с автоматическими выключателями, стенными розетками и лампами, а также на общих знаниях об электричестве.

В том, что касается базовой логики, научное исследование не слишком отличается от починки торшера – разве что каждый его этап может быть гораздо более сложным. Один из подходов, описанный еще Аристотелем, называется индукцией: вы собираете все доступные факты о каком-либо явлении, размышляете, а затем выводите («индуцируете») общие закономерности, объясняющие факты¹. Это весьма распространенный подход, и его применяют для

¹ Индуктивные рассуждения как наилучшая модель для научных размышлений имеют очень долгую историю, и к ним прибегали многие великие философы, в том числе, помимо Аристотеля, Дэвид Юм («Трактат о человеческой природе»), Иммануил Кант («Критика чистого разума») и Джон Стюарт Милль («Система логики силлогистической и индуктивной»). Они утверждали, что сначала ученый должен собрать данные о предмете своего интереса, не задумываясь о связи между

получения самых разных объяснений: как сакральных (таких, как мифы о сотворении мира), так и бытовых (почему не заводится машина). Однако за последние два столетия, по мере развития экспериментальной науки, индуктивный метод перестал быть источником лучших объяснений и превратился в инструмент формулирования предположений. (Ученым нравится термин «гипотеза», философы предпочитают говорить «допущение», но оба этих слова – синонимы «предположения»².)

Значит ли это, что генерирование гипотез превратилось в заурядную и несущественную часть научного познания? Вовсе нет! Чтобы выдвинуть хорошее предположение, требуются фундаментальные знания и творческие способности. Как правило, хорошая гипотеза неожиданна (никто ранее не задумывался об этом или не принимал эту мысль всерьез), интересна, проверяема и может подтверждаться во многих экспериментах. Иногда вместо слова «проверяемость» используют термин «фальсифицируемость» – чтобы гипотеза считалась научной, должна существовать возможность ее опровержения с помощью объективных, повторяемых экспериментов³. Проверки, необходимые для оценки гипотезы (то есть для того, чтобы принять или отвергнуть предположение), должны быть строгими. (Принятие гипотезы означает лишь то, что она пока не отвергнута.) По сути, ученые пытаются выявлять причинно-следственные связи, и поэтому научная гипотеза обычно имеет следующий вид: «А является причиной В». Приведем пример из нашего лабораторного исследования медицинских пиявок. Мы предположили, что определенные нейроны в нервной системе пиявки запускают ее плавательные движения. Основываясь на результатах первоначальных экспериментов, аспирантка Дженис Уикс обнаружила разновидность нейронов, подходящих на эту роль; она назвала их клетками типа 204⁴. Как мы могли проверить ее предположение, что именно клетки типа 204 отвечают за плавание? В сущности, есть три общепринятые категории проверок на причинно-следственную связь: проверки на корреляцию, необходимость и достаточность. В экспериментах Дженис с клетками 204 проводились проверки всех категорий.

Корреляция. Записи электрических сигналов клеток 204 показали, что нейроны всегда активизируются непосредственно перед тем, как животное начинает плавать, и остаются активными все время, пока оно плавает, – то есть активность клеток *коррелирует* с процессом плавания. Обратите внимание: даже этот самый слабый тест на причинно-следственную связь мог бы опровергнуть наше предположение в том случае, если бы клетки 204 не были активны

фрагментами полученной информации (потому что размышления о причине и следствии могут повлиять на сбор данных), а затем последует ослепительная вспышка озарения, и ответ станет ясен. Философы XX века, такие как Карл Поппер («Предположения и опровержения: рост научного знания») и Томас Кун («Структура научных революций»), утверждали, что истинная индукция бесплодна (она ограничена доступными данными) и, кроме того, ученые все равно действуют иначе. У ученого всегда есть по крайней мере общие соображения (догадки) о том, что важно, и именно они указывают, какие данные следует собирать; здесь начинается цикл «предположение – проверка – интерпретация». Интересная дискуссия по этому вопросу содержится в эссе Питера Медава *The Philosophy of Karl Popper* (1977) из опубликованного после его смерти сборника под названием *The Threat and the Glory* (New York: Harper Collins, 1990). Каждый начинающий ученый должен прочесть эту работу и вдохновиться ею, прежде чем переступить порог лаборатории, а всем прочим для лучшего понимания было бы неплохо прочесть ее дважды.

² Есть и другие синонимы: например, «правильная догадка», или более напыщенно – «удачный всплеск творческого таланта»; но мы предпочитаем «предположение». «Удачный всплеск» – это цитата из Уильяма Уэвелла (*History of the Inductive Sciences*, London: John W. Parker, 1837), приведенная в книге Питера Медава *The Limits of Science* (New York: Harper and Row, 1984). Сэр Питер Медавар был чрезвычайно успешным британским иммунологом (в 1960 году он получил Нобелевскую премию по физиологии и медицине) и написал множество научно-популярных эссе и книг для широкой публики, а также философских работ для ученых. Все его произведения – образцы ясности мышления, и читать их – истинное удовольствие.

³ Этой теме посвящено множество книг. Самая авторитетная из них – «Логика научного исследования» Карла Поппера, впервые опубликованная в Германии в 1935 году. (Философы считают ее немного старомодной, однако ученые-исследователи утверждают, что в ней описано почти все, чем они занимаются ежедневно.) Более современная и доступная книга на эту тему – *Failure* Стюарта Файрштейна (New York: Oxford University Press, 2016).

⁴ J. C. Weeks and W. B. Kristan, Jr., «Initiation, Maintenance, and Modulation of Swimming in the Medicinal Leech by the Activity of a Single Neuron», *Journal of Experimental Biology* 77 (1978): 71–88.

во время плавания. Иными словами, с помощью теста на корреляцию можно опровергнуть гипотезу – но не подтвердить ее.

Достаточность. Стимуляция одной клетки типа 204 (одного из приблизительно 10 тысяч нейронов центральной нервной системы пиявки) заставляла животное плавать. Мы пришли к выводу, что активации одной клетки 204 *достаточно*, чтобы пиявка начала плавать. Но этот тест не доказывал, что активация клетки 204 – единственный способ вызвать плавательные движения. Нужны были дополнительные тесты.

Необходимость. Деактивация одной клетки 204 (путем пропускания через нее электрического тока, вызывающего торможение) снижала вероятность того, что стимуляция нерва заставит животное плавать. Это значит, что активность клетки 204 *необходима* для плавания – по меньшей мере частично. (В нервной системе пиявки 12 клеток типа 204, и только две из них можно контролировать одновременно; этот факт объясняет, почему вероятность плавания лишь снижалась, а не сводилась к нулю.)

По итогам этих экспериментов, а также аналогичных опытов с нервной системой других животных клетки типа 204 были признаны «командными нейронами» – их активация вызывает определенные действия (то есть «подает команду» к этим действиям). Считается, что командные нейроны связывают сенсорный вход с моторными зонами мозга: они принимают входящие сигналы от сенсорных нейронов, и если эти сигналы активируют их, то они, в свою очередь, инициируют то или иное моторное действие. Эти нейроны также называют «нейронами принятия решений», поскольку предполагается, что их истинная функция – выбор нужного действия из нескольких возможных (например, плыть или ползти).

Первые эксперименты с клетками типа 204 были проведены почти 40 лет назад, и поэтому разумно задать вопрос: мы по-прежнему верим в первоначальные выводы из цепочки «предположение – проверка – интерпретация»?⁵ И да, и нет. Основные данные выдержали проверку временем (и много раз воспроизводились), но дальнейшие эксперименты выявили и другие нейроны, по своим функциям похожие на клетки 204, и поэтому первоначальный вывод о том, что за плавание пиявки отвечают только клетки 204, оказался упрощением. Эксперименты с использованием красящих веществ, которые светятся, сообщая об электрической активности нейрона (это позволяет одновременно наблюдать за работой множества нейронов), показали: решение о том, что должна делать пиявка – плыть или ползти, – принимается на основе трудноуловимых взаимодействий между многими нейронами. Клетки 204 вместе с другими командными нейронами подают сигнал к моторному действию после завершения этих тонких взаимодействий. Таким образом, клетка 204 не «главнокомандующий», а скорее «лейтенант», выполняющий приказы «коллективного руководства», которое и принимает решения⁶.

⁵ Новейшие представления о нейронной цепи, отвечающей за плавание пиявки, изложены в обзорной статье: W. B. Kristan, Jr., R. L. Calabrese, and W. O. Friesen, «Neuronal Basis of Leech Behaviors», *Progress in Neurobiology* 76 (2005): 279–327.

⁶ В последнее время стали возможны аналогичные эксперименты с мозгом, который больше похож на мозг человека, чем мозг пиявки, и это позволило ученым задаться вопросом, есть ли в нашем мозге нейроны с такими же функциями, как у клеток 204 в мозге пиявки. Серьезным препятствием к выяснению функций отдельных нейронов стало огромное количество нервных клеток в мозге млекопитающих. Однако в последнее десятилетие методы визуализации и селективной экспрессии молекул, регистрирующих активность нейронов, позволили исследовать поведенческие функции множества нейронов одновременно. В результате эксперименты, подобные тем, что описаны для клеток 204, теперь могут проводиться и на более сложном мозге, например рыбьем и мышинном. Ученые визуализируют нейроны с известной функцией, выясняя корреляцию их активности с поведением животного. После генетической модификации нейроны начинают вырабатывать чувствительные к свету белки, и в результате ученые получают возможность воздействовать на эти нейроны светом с определенной длиной волны, включая или выключая их во время поведенческого теста, чтобы определить их достаточность и необходимость для данного поведения. Подобные эксперименты – наряду с другими – привели к настоящему перевороту в исследованиях нейронной основы поведения животных со сложным мозгом. Подробную информацию об этой методике можно найти в приведенных ниже работах. В первых двух рассматривается сам метод, а в остальных описаны эксперименты, выполненные с его помощью. K. Deisseroth, «Controlling the Brain with Light», *Scientific American* 303 (2010): 48–55; K. Deisseroth, «Optogenetics: 10 Years of Microbial Opsins in Neuroscience», *Nature Neuroscience* 18 (2015): 1213–1225; E. Pastrana, «Primer on Optogenetics.

Помня об экспериментах с клетками типа 204, вернемся к значению слова «вера» в науке. Этот вопрос нужно рассматривать как минимум на трех уровнях.

1. Есть ли возможность опровергнуть гипотезу? Если не существует способа опровергнуть гипотезу с помощью объективных, осуществимых экспериментов, эта гипотеза может быть интересной, но не может относиться к научной сфере.

2. Считаем ли мы данные достоверными? Для ответа на этот вопрос мы должны оценить применимость методик, тщательность экспериментов, убедительность результатов. Например, в типовом эксперименте с целью выяснить функцию той или иной зоны мозга исследователи будут вмешиваться в работу этой зоны и регистрировать изменения в поведении или активности мозга. Для выявления изменений экспериментатор использует стимулы и фиксирует реакцию на них. Зачастую данные неоднозначны: один и тот же стимул может вызывать разную реакцию, а два разных стимула – одинаковую. Причин тому может быть много, и существуют проверенные методы обнаружения и разрешения такого рода проблем. Например, можно не посвящать человека, оценивающего результаты, в подробности исследования (это называется «слепым» методом). Или можно повторить эксперимент в другой лаборатории, с другими сотрудниками, оборудованием и сложившимися практиками проведения опытов.

3. Доверяем ли мы интерпретации? В целом интерпретация – самая интересная часть любого научного исследования (и именно она, как правило, попадает в СМИ), но вместе с тем эта часть наиболее часто подвергается пересмотру. Как показала история с клетками 204 в нервной системе пиявки, новые данные могут существенно изменить интерпретацию, и этот процесс бесконечен. Карл Поппер, влиятельный ученый в области философии науки XX века, утверждал, что наука не должна даже надеяться, что когда-либо выяснит абсолютную истину⁷. Хорошо обоснованное современное суждение, приближающее нас к истине, может объяснить все (или, по крайней мере, многие) текущие наблюдения, но дополнительные данные в конце концов заставят ученых усомниться в любой интерпретации и заменить ее более полной. Поппер утверждает, что старая интерпретация не отвергается полностью; просто новые данные позволяют еще ближе подойти к истине. По сути, интерпретация полученных данных порождает предположения для новой серии экспериментов – точно так же, как при попытке починить неисправный торшер.

Чем же «научная вера» отличается от других разновидностей веры? Одно из главных отличий состоит в том, что наука – по крайней мере, экспериментальная – ограничивается идеями, которые можно проверить с помощью объективных, воспроизводимых и однозначных экспериментов. Если другие исследователи проведут такие же эксперименты, они получат те же результаты. Это ограничение исключает из поля зрения науки множество чрезвычайно интересных вопросов, таких как «Зачем мы живем?» и «Существует ли Бог?». За пределами науки оказываются даже целые дисциплины вроде астрологии: они похожи на науку в том смысле, что оперируют огромным количеством данных, однако их выводы невозможно проверить объективными методами⁸. В научных статьях обычно есть разделы «Результаты» и

Optogenetics: Controlling Cell Function with Light», *Nature Methods* 8 (2010): 24–25; V. Emiliani, A. E. Cohen, K. Deisseroth, M. Haussler, «All-Optical Interrogation of Neural Circuits», *Journal of Neuroscience* 35 (2015): 13917–13926.

⁷ Карл Поппер писал о последовательном приближении к истине в нескольких своих работах, но наиболее доступно эта идея изложена в эссе под названием «Наука: предположения и опровержения»; изначально это была лекция, прочитанная в Кембридже, а в 1953 году ее текст вошел в книгу «Предположения и опровержения: рост научного знания». Стюарт Файрштейн в своей работе *Failure* соглашается, что отклонение предположений – обычный путь научного прогресса, но рассматривает этот вопрос под иным углом. Файрштейн утверждает, что лишь немногие ученые постоянно применяют стратегию «предположение – проверка – интерпретация», хотя все пишут статьи так, будто следовали именно ей. Он называет отклонение гипотезы одним из типов неудач и считает, что именно неудачи этого типа приносят наибольшую пользу научному прогрессу.

⁸ В книге «Логика научного исследования» Карл Поппер рассказал, что заинтересовался философией, задумавшись, чем

«Обсуждение результатов». Для того чтобы поверить в результаты, нужно оценить, правильно ли поставлен эксперимент и могут ли другие исследователи его воспроизвести; такая оценка будет относительно объективной. Верить ли утверждениям из раздела «Обсуждение результатов» – вопрос более сложный. Подтверждают ли данные интерпретацию? Логичны ли выводы и основаны ли они на результатах этой и предыдущих работ? Является ли интерпретация отправной точкой для дальнейших проверяемых гипотез? Хотя обсуждение результатов зачастую представляет собой самую интересную часть научной статьи, эта часть с наименьшей вероятностью выдерживает проверку временем. Тех, кто не знаком с той или иной областью исследований, изменения интерпретаций могут сбивать с толку и раздражать (например, полезны или вредны жиры?), но такие последовательные приближения – неотъемлемая часть научного процесса. Если интерпретация поэзии искажает ее суть, то в научной интерпретации наиболее ярко раскрывается творческий потенциал исследователя. Изменчивость интерпретаций означает, что все заявления о вере подразумевают оговорку: то, во что ученый верит сегодня, может существенно измениться после следующей серии экспериментов, которые проведет он сам или – если не повезет – кто-то другой. Ученый должен быть готов отказываться от любимых убеждений и принимать другую точку зрения, когда этого требуют полученные данные, а прочим людям следует помнить о преходящем характере этих убеждений.

наука отличается от таких разных областей знания, как астрология, метафизика и психоанализ. Он пришел к выводу, что отличие научных теорий в том, что их можно проверить и опровергнуть: «Каждая “хорошая” научная теория является некоторым запрещением: она запрещает появление определенных событий. Чем больше теория запрещает, тем она лучше» (К. Поппер, «Предположения и опровержения»). (Файрштейн в работе *Failure* добавляет к этому списку современные феномены, такие как саентология, теория разумного замысла и ряд направлений альтернативной медицины, в качестве примеров принципиально непроверяемых теорий.) Поппер указывал, что существуют вполне достойные области интеллектуальной деятельности – например, метафизика и этика, – которые очень важны для культуры и для выживания человечества, но по природе своей ненаучны, поскольку не могут быть проверены. Этот вопрос был блестяще освещен Питером Медаваром в книге *The Limits of Science*. Вот две цитаты из нее: «Если искусство политики – это действительно искусство возможного, тогда искусство научного исследования – это, без сомнения, искусство объяснимого». «За ответами на вопросы, которые имеют отношение к происхождению мира и эсхатологическим событиям [например, в чем смысл жизни], мы должны обращаться не к науке, а к метафизике, художественной литературе или религии. Эти ответы не выводятся из эмпирических данных и не требуют подтверждения ими, и поэтому бессмысленно спрашивать, истинны они или ложны. Вопрос в том, помогут ли они кому-то обрести душевное спокойствие, избавят ли от тревоги непонимания и рассеют ли страх перед неизвестным».

Развитие и изменение

Генетика проливает свет на природу индивидуальности

Джерemi Натанс

В ЭТОМ МОГ УБЕДИТЬСЯ ВСЯКИЙ, кто проводил время в обществе четырехлетних детей. Даже в таком юном возрасте люди очень сильно отличаются друг от друга. Одни дети коммуникабельные, другие робкие. Кто-то усидчив, а кто-то все время переключается с одного занятия на другое. Кто-то упрям, а кто-то покладист. И в зрелом возрасте индивидуальные черты в значительной степени определяют, кто мы такие: пессимисты или оптимисты, общительные или замкнутые, властолюбивые или беззаботные, отзывчивые или недоверчивые. Личные особенности тысяч и миллионов людей в совокупности определяют черты общества.

Чем же определяется индивидуальность? Насколько она заложена в человеке от рождения? И в какой мере ее формирует опыт? По сути, это вопросы о развитии, функционировании и пластичности мозга – одни из самых серьезных, которые мы можем задать науке о мозге.

Больше ста лет назад британский ученый-энциклопедист Фрэнсис Гальтон сформулировал эти вопросы в их нынешнем виде⁹. Гальтон считал, что личность, интеллект и другие психологические характеристики формируются под общим влиянием «природы и воспитания». За прошедшее столетие исследования в области поведения животных, психологии и генетики позволили добиться некоторого прогресса в изучении этой темы.

Если говорить о выводах, полученных из наблюдений за нашими собратями из животного мира, стоит начать с работы двоюродного брата Гальтона – Чарльза Дарвина, заинтересовавшегося теми изменениями во внешности и поведении, которых можно добиться путем селекции домашних животных. Рассмотрим, например, характеры собак. Любой владелец собаки знает, что у каждого животного свой темперамент, способности (или отсутствие таковых) и привычки – иными словами, набор черт, из которых складывается индивидуальность животного. Удивительно, но все эти черты во многом определяет генетика. Дружелюбие золотистого ретривера, пастуший инстинкт австралийской овчарки и самодисциплина немецкой овчарки – все это в значительной степени результат селекции. Владельцы и заводчики собак ценят эти черты не меньше, чем экстерьер.

Если мы обратимся к более распространенным поведенческим особенностям собак (тем, что отличают домашних собак от диких), то обнаружим, что самая важная характеристика, общая для одомашненных пород, – это покорность, развившаяся в результате фундаментального изменения в условиях взаимодействия с людьми. Эта черта, в частности, проявилась в переосмыслении зрительного контакта: прямой взгляд в глаза из угрозы превратился в знак привязанности. В знаменитом исследовании чернобурых лисиц, проведенном Дмитрием Беляевым, Людмилой Трут и их коллегами, поведенческий переход из дикого состояния в одомашненное произошел всего за 30–40 поколений в процессе селекции диких лисиц¹⁰. В результате этого эксперимента, начатого в Новосибирске еще в конце 1950-х годов, были выведены лисицы, обладающие многими из тех симпатичных черт, которые мы ассоциируем с домашними собаками: одомашненные лисы виляют хвостом, лижут руки, реагируют на зов и стремятся к физическому и зрительному контакту с людьми.

⁹ F. Galton, *Inquiries into Human Faculty and Its Development* (London: J. M. Dart, 1907), доступно на сайте www.galton.org.

¹⁰ D. K. Belyaev, «Destabilizing Selection as a Factor in Domestication», *Journal of Heredity* 70 (1979): 301–308 (на русском языке: Беляев Д. К. Дестабилизирующий отбор как фактор домостикации // Генетика и благосостояние человечества. М.: Наука, 1981); L. Trut, «Early Canid Domestication: The Farm-Fox Experiment», *American Scientist* 87 (1999): 160–169.

Один из выводов, сделанных по итогам новосибирского эксперимента, состоит в том, что у популяции диких лисиц уже имелись генетические особенности, необходимые для преобразования характера из дикого в домашний. И действительно, исследователи отмечали, что «дружелюбное» поведение начало проявляться уже через четыре поколения селекции («дружелюбие» определялось по взаимоотношениям между лисами и людьми). В настоящее время точно неизвестно, какие именно генетические изменения ответственны за покорность черных лисиц, но Беляев, Трут и их коллеги доказали, что эти изменения – какими бы они ни были – привели к гормональным изменениям, в том числе к снижению уровня гормонов стресса, таких как глюкокортикоиды. Возможно, особи с поведением типа А (по Фридману) оптимально приспособлены к миру, в котором следующий прием пищи не гарантирован, а любое крупное животное с высокой вероятностью может оказаться врагом.

Насколько выводы о влиянии генетики на поведенческие черты животных применимы к людям? В 1979 году ученый-психолог Томас Бушар из Университета Миннесоты предпринял одну из самых амбициозных попыток ответить на этот вопрос. На протяжении следующих 20 лет Бушар и его коллеги изучали те редкие случаи, когда близнецы усыновлялись разными семьями и росли в разной обстановке; исследователи хотели понять, как одинаковые гены и разная среда влияют на сходство и различия психики¹¹. В Миннесотском исследовании близнецов, выросших порознь (MISTRA), сравнивались однояйцевые и разнояйцевые близнецы, а также, в сотрудничестве с Дэвидом Ликкеном (коллегой Бушара по Университету Миннесоты), близнецы, воспитывавшиеся раздельно, сравнивались с близнецами, выросшими вместе¹².

Однояйцевые близнецы (их еще называют монозиготными) развиваются из одной оплодотворенной яйцеклетки, которая на ранней стадии развития делится на два эмбриона. Эти близнецы наследуют от родителей один и тот же вариант каждого гена и поэтому генетически идентичны. А поскольку однояйцевые близнецы наследуют один и тот же набор X- и Y-хромосом, они бывают только однополыми. То есть пара однояйцевых близнецов может состоять из двух мальчиков или двух девочек, но не из мальчика и девочки. В среднем примерно у одного из 270 человек есть однояйцевый близнец.

В отличие от однояйцевых разнояйцевые (или дизиготные) близнецы появляются тогда, когда во время овуляции из яичника выходят две яйцеклетки, которые оплодотворяются двумя сперматозоидами, а затем развиваются в два эмбриона. Такие близнецы похожи друг на друга не больше, чем обычные братья и сестры. От других братьев и сестер разнояйцевых близнецов отличает только то, что они одновременно развиваются в матке и рождаются в один день. Генетики исходят из того, что «в среднем у разнояйцевых близнецов совпадают 50 % генов»¹³. Таким образом, поскольку разнояйцевые близнецы наследуют X- и Y-хромосомы независимо друг от друга, они могут быть как одного пола (мальчик + мальчик или девочка + девочка), так и разного (мальчик + девочка или девочка + мальчик). В среднем примерно у одного из 115 человек есть разнояйцевый близнец.

В самом простом исследовании близнецов некий измеримый параметр (например, рост, вес или кровяное давление) сравнивается у большого количества пар однояйцевых и разнояйцевых близнецов. Различия по этому параметру вычисляются для каждой пары, а затем

¹¹ T. J. Bouchard, D. T. Lykken, M. McGue, N. L. Segal, and A. Tellegen, B «Sources of Human Psychological Differences: The Minnesota Study of Twins Reared Apart», *Science* 250 (1990): 223B–228.

¹² N. L. Segal, *Born Together – Reared Apart: The Landmark Minnesota Twin Study* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2012).

¹³ Тезис «в среднем у разнояйцевых близнецов совпадают 50 % генов» – это сокращенный вариант более точного утверждения: «у разнояйцевых близнецов вероятность наследования одного и того же варианта любого гена от каждого из родителей составляет 50 %». Например, если у матери есть два разных варианта гена, определяющего цвет глаз, то каждый из близнецов с вероятностью 50 % унаследует первый вариант и с вероятностью 50 % – второй. Из этого утверждения читатель без труда выведет все возможные комбинации наследования и увидит, что в среднем разнояйцевые близнецы в половине случаев наследуют один и тот же вариант гена, а в другой половине случаев – разные.

ученые сравнивают полученные результаты в группах однояйцевых и разнаяйцевых близнецов. Поскольку однояйцевые близнецы всегда одного пола, в исследовании участвуют только однополые разнаяйцевые близнецы. Одно из подобных исследований, например, показало, что средняя разница в росте между разнаяйцевыми близнецами составляет 4,5 сантиметра, а между однояйцевыми близнецами – 1,7 сантиметра. Меньшая разница в росте у однояйцевых близнецов обусловлена бблшим генетическим сходством.

Внимательный читатель, возможно, заметил в этом типе исследований слабое место – особенно применительно к психологическим вопросам. Однояйцевые близнецы так похожи, что их часто путают, и это может вызвать недоразумения. В результате учителя, друзья или даже родственники нередко относятся к ним одинаково – или потому, что не в состоянии их различить, или из предположения, что два человека с одинаковой внешностью не должны различаться и в других аспектах. Сходство в межличностных отношениях такого типа создает то, что в поведенческой генетике называется «общей средой», и это затрудняет анализ соотношения влияния природы и воспитания. Кроме того, как будет показано далее, у однояйцевых близнецов наблюдается сходство в широком диапазоне личностных характеристик и, скорее всего, вследствие этого формируется невероятно тесная связь друг с другом. Возникает вторая проблема: что, если тесные межличностные отношения между однояйцевыми близнецами усиливают их психологическое сходство и сглаживают различия?

Изучение близнецов, разлученных при рождении или в раннем детстве, позволяет ответить на эти вопросы. Как показало исследование MISTRA, особенно информативно здесь сравнение однояйцевых близнецов, воспитывавшихся порознь, с разнаяйцевыми, также воспитывавшимися порознь. В этом случае близнецы в парах генетически идентичны соответственно либо на 100 %, либо в среднем на 50 %, но условия, в которых они воспитывались, по большей части не совпадают. Два других информативных подхода – это сравнение однояйцевых близнецов, воспитывавшихся вместе и порознь, и сравнение разнаяйцевых близнецов, воспитывавшихся вместе и порознь. В последнем случае используется другой способ оценки влияния одинаковой и разной среды в детские годы, когда происходит формирование личности.

За 20 лет работы по проекту MISTRA ученые изучили 81 пару однояйцевых близнецов, выросших порознь, и 56 пар разнаяйцевых близнецов, выросших порознь. Средний возраст близнецов на момент исследования составлял 41 год. В среднем они провели вместе всего пять месяцев, прежде чем их разлучили, и не поддерживали контакт друг с другом в среднем на протяжении 30 лет. В процессе исследования каждый участник провел около недели в Университете Миннесоты, где проходил психологическое тестирование, а также физическое и медицинское обследование.

Результаты психологических тестов удивили ученых. В случае со многими чертами личности, такими как экстраверсия/интроверсия и эмоциональная устойчивость/неустойчивость, влияние генетики оказалось существенным – в среднем порядка 40 %. Более того, столь же сильное влияние генетики обнаружилось в выборе профессии и в некоторых социальных аспектах, таких как религиозность или приверженность традициям.

Из всех психологических характеристик человека наиболее активно исследовался коэффициент интеллекта (IQ), который оценивался по результатам письменного теста на знания и интеллектуальные навыки. Термин «коэффициент интеллекта» звучит слишком претенциозно, но сам тест представляет и теоретический, и практический интерес, поскольку его результаты хорошо предсказывают будущие образовательные и профессиональные успехи¹⁴. Данные MISTRA показали, что у исследуемой группы населения 70 % расхождений в результатах теста

¹⁴ Важно подчеркнуть, что результаты теста на IQ, как и всех стандартизированных тестов, следует интерпретировать с учетом культурного контекста. Несмотря на то, что существование и измеримость «врожденного» интеллекта можно считать общепризнанными, маловероятно, что стандартизированный тест позволит измерить его объективно, без искажений, вызванных культурными стереотипами.

на IQ можно объяснить генетикой. В частности, разница в IQ у однояйцевых близнецов, выросших порознь, была лишь немногим больше, чем средний разброс результатов теста на IQ у одного и того же человека, проходившего тест два раза. Систематический анализ разных приемных семей, в которых воспитывались разлученные однояйцевые близнецы, показал слабое влияние на результат теста на IQ таких факторов, как уровень образования приемных родителей, а также богатая культурная или научная среда. Это важные выводы, однако они нуждаются в некоторых уточнениях, поскольку не учитывают влияние исключительных обстоятельств, таких как особенно богатая культурная среда или, напротив, ее недоступность. Почти все участники MISTRA воспитывались в семьях и социуме, где имела возможность получить хорошее образование, поэтому выявленный уровень генетического влияния применим к условиям этой благоприятной среды.

Я упомянул здесь исследование MISTRA из-за его масштаба и образцового дизайна, но аналогичные результаты, касающиеся личности и IQ, были получены в десятках других работ, посвященных изучению близнецов и семей¹⁵. Особый интерес представляет сравнение 110 пар однояйцевых близнецов и 130 пар разнояйцевых близнецов в возрасте более 80 лет: у однояйцевых близнецов обнаружилась большая степень сходства по каждому из тестируемых параметров, в том числе по общим когнитивным способностям (IQ), памяти, вербальным навыкам, пространственной ориентации и скорости обработки информации¹⁶. Это исследование также показало, что влияние генетики на IQ почти не снижается с возрастом, хотя ни в этой, ни в других работах не проверялось, насколько результаты теста на IQ отражают мотивацию, любознательность и самодисциплину, а не только «интеллект» в чистом виде.

Исследования близнецов позволяют оценить средний вклад генетики в индивидуальные различия личностных черт и когнитивных способностей, но не выявляют биологические механизмы, лежащие в основе этих различий. Можно сказать, что такие исследования дают нам данные, аналогичные техническим характеристикам разных марок автомобилей. Мы можем узнать, что «порше» разгоняется быстрее «тойоты», но чтобы понять причину этой разницы, необходимо во всех подробностях знать, чем различаются эти машины. Кроме того, нам понадобятся общие знания об устройстве автомобиля.

В биологии «заглянуть под капот» – значит понять, как растут клетки, как происходит их специализация, как они взаимодействуют и выполняют те или иные функции. Необходимо также выяснить, как именно генетическая последовательность, которую наследует каждый из нас, передает информацию о белках, заключающих в себе молекулярные механизмы, от которых зависит строение и функционирование клетки. Это очень сложная задача, и до полного понимания этих процессов нам еще далеко. Тем не менее за последние 50 лет нейробиология добилась значительных успехов. Теперь мы знаем основные механизмы коммуникации нервных клеток, а также многие механизмы, отвечающие за формирование связей между нервными клетками в процессе развития.

Особенно быстро развивается генетика. Сегодня нам известны полные последовательности ДНК человека и десятков других видов животных, а также частичные последовательности ДНК сотен тысяч отдельных людей. Эти последовательности показывают, что наш генетический код очень похож на генетические коды других млекопитающих. Таким образом, огромное разнообразие внешних признаков и интеллектуальных способностей млекопитающих, скорее всего, обусловлено совокупностью относительно небольших различий в структуре и функционировании генома. Кроме того, сравнение генетического кода разных людей показывает, что

¹⁵ L. J. Eaves, H. J. Eysenck, and N. G. Martin, *Genes, Culture, and Identity: An Empirical Approach* (New York: Academic Press, 1989).

¹⁶ G. E. McLearn, B. Johnnasson, S. Berg, N. L. Pederson, F. Ahern, S. A. Petrill, and R. Plomin, «Substantial Genetic influence on Cognitive Abilities in Twins 80 or More Years Old», *Science* 276 (1997): 1560–1563.

генетически мы отличаемся друг от друга лишь на одну тысячную часть¹⁷. Выяснить, каким образом эти генетические различия влияют на формирование нашей личности, – одна из величайших научных задач, стоящих перед человечеством.

¹⁷ E. S. Lander, «Initial Impact of the Sequencing of the Human Genome», *Nature* 470 (2011): 187–197.

Мозг состоит из миллиардов нейронов, но связи между ними могут формироваться по очень простым правилам

Алекс Колодкин

НЕОБЫЧАЙНАЯ СЛОЖНОСТЬ НЕЙРОННЫХ СВЯЗЕЙ вызывает закономерный вопрос: какие метки, или маркеры, помогают упорядочить организацию этих связей? Попробуйте представить, что вам необходимо подключить тысячи телефонов в новом здании Всемирного торгового центра в Нью-Йорке к центральным коммутаторам. Разноцветные провода, пронумерованные телефонные гнезда и множество уникальных меток – вот то, что поможет вам ничего не перепутать. Но чтобы использовать прием с «уникальными метками» при построении человеческого мозга, вам понадобились бы миллиарды особых молекулярных маркеров. Возможно ли вообще подобное шифрование связей? За сто лет исследований нейробиологи обнаружили лишь несколько сотен молекул, которые избирательно управляют формированием связей между нейронами. Но даже если бы все гены человеческого генома производили только маркеры связей, получилось бы всего 20 тысяч уникальных маркеров – гораздо меньше, чем нужно для кодирования всех связей в мозге человека¹⁸. Недавнее исследование зрительной системы насекомых показало, что чрезвычайно сложные связи огромного количества нейронов могут диктоваться очень простыми правилами; каждый отдельный нейрон способен следовать этим правилам самостоятельно и в отсутствие несметного числа уникальных меток выстраивать сложные специфические связи со множеством других нейронов. В какой же степени нервная система – это результат самосборки? Как ни странно, в значительной.

Огромный вклад в наше понимание сложности и логики нейронных связей внес в начале XX века испанский нейроанатом Сантьяго Рамон-и-Кахаль¹⁹. Вооружившись примитивным по нынешним меркам микроскопом и применив метод окрашивания, который позволял маркировать лишь очень малую долю из огромного числа нейронов, Рамон-и-Кахаль совершил экспедицию к неизведанным берегам анатомии и описал классы нейронов на основе их морфологии и структуры связей с другими нейронами. Он по достоинству оценил сложные и красивые формы нейронов и создал превосходные иллюстрации²⁰. Рамон-и-Кахаль предположил, что аксоны, тянущиеся из тела нейрона и зачастую очень длинные, вероятно, передают информацию следующему нейрону, контактируя с его дендритами (древовидными структурами, отходящими от тела клетки), которые, в свою очередь, принимают информацию, передают ее своему аксону, а затем дендритам следующего нейрона и так далее. Эта догадка позволила Рамону-и-Кахалю выдвинуть гипотезу об организации цепей нейронов в нервной системе позвоночных и даже беспозвоночных животных.

Рамон-и-Кахаль изучал не только мозг взрослых особей разных видов, но и нервную систему эмбрионов, и показал в своих работах, насколько сложна зрелая нервная система. Он увидел, что на концах аксонов имеются похожие на ладони утолщения, которые мы теперь называем конусами роста, и «пальцы» на них (филоподии) словно исследуют окружающее пространство. Когда конус роста сталкивается с каким-либо маркером (на расстоянии или вплотную), он направляет аксон в сторону привлекательного маркера или подальше от отталкиваю-

¹⁸ Теоретически нейронные связи могли бы выстраиваться, подчиняясь комбинаторному коду. Однако даже если бы несколько сотен сигнальных молекул сгенерировали множество уникальных комбинаций, это не решило бы проблему, поскольку задача найти точное место каждой из таких молекул в селективном кодировании крайне сложных моделей формирования связей между миллиардами нейронов выглядит не менее трудной.

¹⁹ S. Ramón y Cajal, *Histology of the Nervous System*, trans. N. Swanson and L. W. Swanson (Oxford: Oxford University Press, 1995; впервые издана на испанском языке в 1909 году).

²⁰ J. DeFelipe, *Cajal's Butterflies of the Soul* (Oxford: Oxford University Press, 2010).

щего маркера. Данные, накопленные за последнее столетие, подтвердили догадки Рамона-и-Кахаля²¹. Теперь мы знаем, какие белки, выделяемые клетками, могут издалека привлекать или отталкивать конусы роста и какие белки локального действия, связанные с клеточной мембраной, управляют движением конусов роста. Мы знаем, что аксоны, появившиеся на ранней стадии развития, могут служить направляющими, вдоль которых растут новые аксоны. Постепенно мы приблизились к пониманию того, как совершенствовалась разветвленная схема сложных нейронных связей от червей к насекомым и от насекомых к человеку. Но как карта Нью-Йорка не дает по достоинству оценить архитектурное и культурное наследие города, так и наши скудные знания о строении нервной системы пока не позволяют составить представление о том, каким образом формируются триллионы нейронных связей в человеческом мозге. Обратимся к удобной модели: плодовой мушке *Drosophila melanogaster*.

На протяжении всей истории биологии изучение организмов намного более простых, чем человек, позволяло понять фундаментальные биологические процессы, и нейробиология здесь не исключение. Новаторская работа нескольких ученых, среди которых был великий генетик Сеймур Бензер, показала, что дрозофила – чрезвычайно ценный вид для исследования развития нейронов, передачи информации через синапсы от одного нейрона к другому, общей структуры нейронной цепи и даже сложных форм поведения²². Понятная нейроанатомия, особые генетические механизмы и хорошо изученные молекулы, управляющие нейронами (схожие с теми, что управляют нейронами человека), – все это делает плодовую мушку превосходной моделью для анализа формирования сложных нейронных связей, даже когда число этих связей значительно превышает количество возможных наводящих маркеров, помогающих их выстраивать.

Анализ схемы соединения глаза дрозофилы с мозгом позволяет вплотную подойти к проблеме нейронных связей. Сложный глаз плодовой мушки состоит из 800 структурных элементов – омматидиев, хорошо различимых на поверхности глаза (рис. 2А). На внешней поверхности каждого омматидия имеется маленькая линза (на рис. 2А можно разглядеть эти выпуклые «шляпки»), а под ней располагается группа из восьми светочувствительных нейронов, или фоторецепторов (они обозначены буквами PR – для простоты мы рассмотрим только шесть из них). Фоторецепторы в омматидии реагируют на свет с разной длиной волны, передавая электрические сигналы по своим аксонам (рис. 2В). Аксоны фоторецепторов тянутся к аналогично расположенным структурным единицам – патронам оптического ганглия в зоне мозга, которая называется ламиной. Важно, что количество и расположение фоторецепторов в каждом омматидии одинаково для всех приблизительно 800 омматидиев в обоих глазах дрозофилы. Представляет интерес разница в строении глаз насекомых: у дневных насекомых (активных днем), в том числе бабочек, все фоторецепторы одного омматидия воспринимают свет одного направления (параллельные стрелки на рис. 2С), а их аксоны тянутся к одному и тому же патрону (рис. 2С), то есть этот механизм относительно прост. Однако у насекомых, активных ночью, в том числе у дрозофилы, развился адаптивный механизм – суперпозиция нейронов, которая повышает чувствительность к свету в сумерках или ночью, не снижая четкости зрения²³.

²¹ A. L. Kolodkin and M. Tessier-Lavigne, «Mechanisms and Molecules of Neuronal Wiring: A Primer», *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* 3 (2011): 1–14.

²² S. Benzer, В «From Gene to Behavior», *Journal of the American Medical Association* 218 (1971): 1015ВБ–1022; D. Anderson and S. Brenner, В «Obituary: Seymour Benzer (1921ВБ–2007)В», *Nature* 451 (2008): 139.

²³ E. Agi, M. Langen, S. J. Altschuler, L. F. Wu, T. Zimmermann, and P. R. Hiesinger, «The Evolution and Development of Neural Superposition», *Journal of Neurogenetics* 28 (2014): 216–232. Такая организация нейронных связей у «продвинутых» мух, таких как дрозофила, называется суперпозицией нейронов, и мы пока не знаем, каким образом формируется сложная схема связей между фоторецепторами соседних омматидиев и одним патроном ламины.

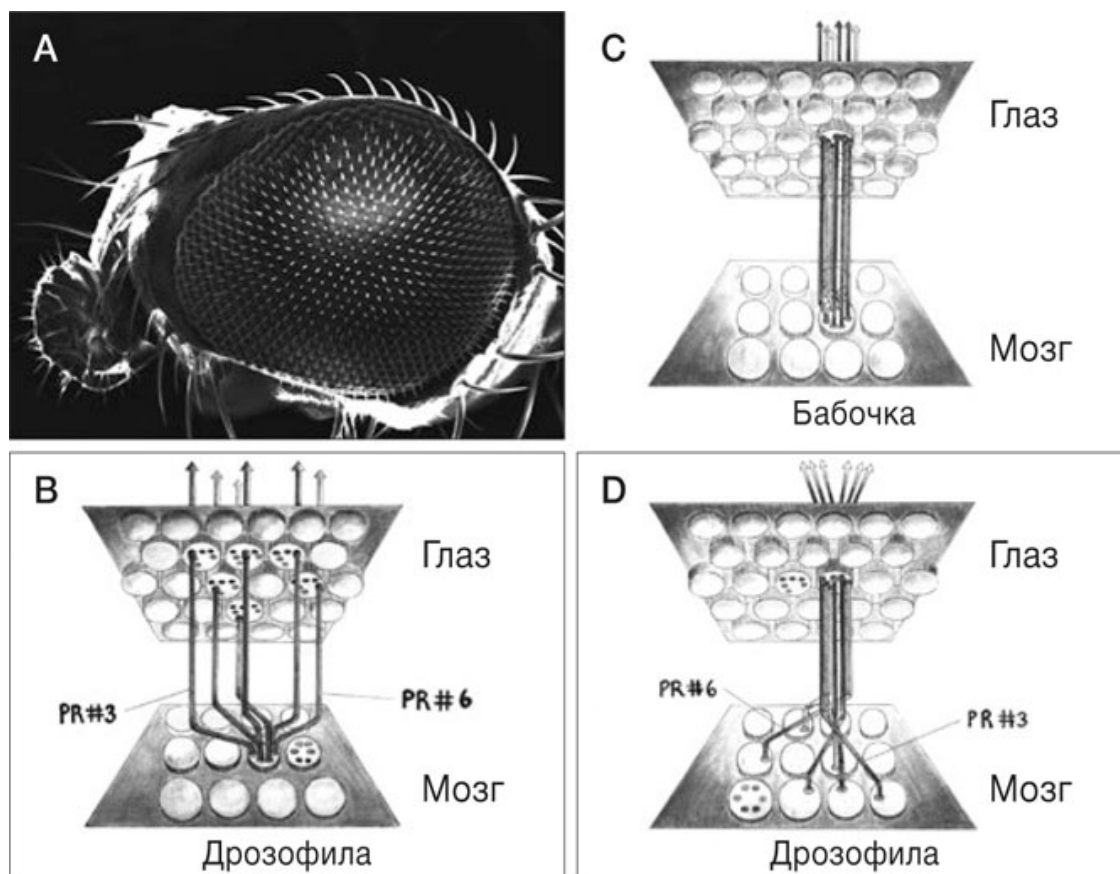


РИС. 2. Нейронные связи в глазу насекомого. (А) Поверхность глаза дрозофилы состоит из приблизительно 800 омматидиев. Обратите внимание на выпуклую поверхность каждого омматидия: это линза, которая фокусирует свет на фоторецепторах. (В) Схема связей между глазом и мозгом дрозофилы. Связи шести разных фоторецепторов (PR) глаза, воспринимающих свет одного направления (стрелки вверх) и расположенных в *соседних* омматидиях; аксоны сложными путями подходят к одной и той же мишени (патрону оптического ганглия) в мозге. Аксоны двух из шести таких фоторецепторов обозначены как PR#3 и PR#6. (С) Схема нейронных связей глаза и мозга у бабочки. В отличие от дрозофилы у бабочки фоторецепторы, воспринимающие свет одного направления (стрелки вверх), расположены в *одном* омматидии. Их аксоны тянутся напрямую к одному патрону – эта схема гораздо проще, чем у дрозофилы. (D) Схема связей между глазом и мозгом у дрозофилы. Все фоторецепторы *одного* омматидия воспринимают свет разных направлений (стрелки вверх), а их аксоны тянутся к шести разным патронам ламины

Адаптация заключается в том, что шесть фоторецепторов, расположенных в разных, но соседних омматидиях, воспринимают свет одного направления (рис. 2В, параллельные стрелки), а шесть фоторецепторов одного омматидия воспринимают свет разных направлений (рис. 2D, расходящиеся стрелки). Каким же образом аксоны фоторецепторов, воспринимающих свет одного направления и расположенных в соседних омматидиях, тянутся к одному, тому самому патрону ламины (рис. 2В)?²⁴ В отличие от глаза бабочки в глазу дрозофилы это не может осуществляться за счет того, что все фоторецепторы омматидия просто тянут свои аксоны к соответствующему оптическому патрону (сравните рис. 2В и 2С), и это

²⁴ Е. Agi, M. Langen, S. J. Altschuler, L. F. Wu, T. Zimmermann, and P. R. Hiesinger, «The Evolution and Development of Neural Superposition», *Journal of Neurogenetics* 28 (2014): 216–232.

усложняет задачу организации такого рода связей. На рис. 2В показана схема лишь одного набора из шести фоторецепторов в соседних омматидиях, соединяющихся с одним патроном ламины в мозге дрозофилы, однако нужно понимать, что таким сложным образом одновременно распределяются *все* 5000 аксонов фоторецепторов *всех* 800 омматидиев глаза дрозофилы – такой хореографии могли бы позавидовать даже постановщики танцевального шоу в перерыве Суперкубка. «Индивидуальные метки» для каждого соединения фоторецептора с ламинной едва ли помогли бы аксонам не сплестись в запутанный клубок, протягиваясь к своим патронам.

Петер Робин Хизингер и его коллеги исследовали механизмы формирования нейронных связей в глазу дрозофилы тем способом, который одобрил бы Рамон-и-Кахаль: они просто наблюдали²⁵. Воспользовавшись возможностями современных методов микроскопии, которые позволяют получать изображения отдельных аксонов фоторецепторов и их конусов роста, тянущихся к мишеням, ученые вывели простые правила, по которым образуются связи в глазу дрозофилы. Микроскоп – это прибор, который позволяет наблюдателю заглянуть внутрь живой ткани и во всех подробностях разглядеть строение отдельных нейронов, аксонов и их конусов роста²⁶. Эксперимент заключался в наблюдении за аксонами фоторецепторов и их конусами роста на протяжении около 30 часов: столько времени требуется на рост аксона от глаза к головному мозгу у дрозофилы. Тщательный анализ интервальной съемки позволил однозначно идентифицировать каждый из шести фоторецепторов в каждом из 800 омматидиев глаза дрозофилы.

Главный результат наблюдений: в каждом из шести фоторецепторов в любом отдельном омматидии действуют разные модели роста аксона после его контакта с ламинной. Например, аксон от фоторецептора #3 всегда сначала достигает ламины «по прямой», а затем тянется «на юго-восток» с постоянной скоростью (рис. 2В и 2D). И эта модель роста одинакова для всех фоторецепторов #3, расположенных в разных омматидиях глаза. Аксон фоторецептора #6 достигает ламины «по прямой», а затем меняет направление и растет «на запад»; скорость его роста тоже постоянна, но отличается от скорости роста аксона фоторецептора #3. Аналогичным образом ведут себя остальные четыре фоторецептора. Если сравнить направления роста аксонов фоторецепторов #1–6 из *разных* омматидиев, то выяснится, что они идентичны. Получается, что в каждый из шести фоторецепторов встроена уникальная программа роста, которая выполняется одинаково в каждом омматидии и определяет правило, по которому собирается сложная схема соединений нейронов в глазу дрозофилы. Если правило выполняется и все шесть аксонов фоторецепторов растут в заданном направлении с заданной скоростью, это дает удивительный результат: шесть конусов роста аксонов шести фоторецепторов, расположенных в соседних омматидиях и воспринимающих свет одного направления, в одно и то же время сходятся в одном патроне оптического ганглия, и рост останавливается (рис. 2В). Из этого следует второе правило: рост аксонов прекращается *только* после того, как конусы роста всех шести аксонов фоторецепторов достигают ламины и соприкасаются там друг с другом, – и никак не раньше. Таким образом, аксоны фоторецепторов, воспринимающих свет одного направления, находят свой путь через сеть тесно переплетенных аксонов других нейронов и их конусов роста, и процесс не прерывается, если они соприкасаются с конусами роста аксонов фоторецепторов, воспринимающих свет иного направления. Механизм формирования связей между фоторецепторами и мозгом крайне точен, а ошибки редки. Каждый патрон оптического ганглия получает сигналы только от фоторецепторов, воспринимающих свет одного направле-

²⁵ M. L. Langen, E. Agi, D. J. Altschuler, L. F. Wu, S. J. Altschuler, and P. R. Hiesinger, «The Developmental Rules of Neural Superposition in *Drosophila*», *Cell* 162 (2015): 120–133.

²⁶ Нейроны фоторецепторов были помечены путем встраивания гена медузы, кодирующего зеленый флуоресцентный белок (GFP). В результате отдельные помеченные фоторецепторы в глазу дрозофилы светились, и ученым удалось пронаблюдать рост их аксонов в реальном времени.

ния. Это значительно упрощает обработку визуальных сигналов в отделах мозга более высокого уровня – ведь информация о направлении анализируется еще на уровне патрона ламины, первой «ретрансляторной станции» в зрительной системе, сразу после восприятия света фоторецептором. Компьютерное моделирование, выполненное Хизингером и его коллегами, показало, что для формирования нужной связи достаточно одновременной встречи шести конусов роста аксонов фоторецепторов; никаких меток в патроне ламины не требуется. Таким образом, трудноразрешимая, на первый взгляд, задача формирования сложной схемы соединения 5000 аксонов фоторецепторов, необходимой для суперпозиции нейронов, решается при помощи всего шести разных программ роста аксонов фоторецепторов в процессе развития глаза. Очевидно, чтобы направить каждый из приблизительно 5000 аксонов фоторецепторов к своей мишени, не требуется никаких сложных направляющих меток.

Но помогает ли это исследование понять, как формируются нейронные связи в мозге млекопитающих? В мозге человека нет прямых аналогов чрезвычайно четкой схемы организации нейронов глаза дрозофилы, но совершенно очевидно, что в разных областях мозга млекопитающих присутствует ограниченное число разных типов нервных клеток. Нейроны одного типа в мозге млекопитающего следуют очень похожим схемам ветвления аксона и дендритов, устанавливая между собой уникальные связи. Конечно, на формирование этих связей в процессе эмбрионального и раннего постнатального развития могут влиять внешние факторы. В числе этих факторов – сигнальные молекулы и даже электрические сигналы нейрону от других нейронов в цепи. Как бы то ни было, это исследование, проведенное на дрозофилах, напоминает нам о существовании альтернативных путей формирования связей в сложной нейронной сети. Оно даже внушает некоторый оптимизм в отношении клинических подходов к восстановлению нейронов после инсульта или травмы²⁷. Памятуя о том, как развивалась нейробиология, можно ожидать, что этот эксперимент с дрозофилами поможет лучше понять, как простые правила регулируют сложные связи нейронов в мозге человека²⁸.

²⁷ Один из исследуемых методов замещения нейронов, поврежденных в результате инсульта или травмы, заключается в непосредственном введении в поврежденный мозг человека нервных клеток определенного типа, полученных из стволовых клеток. Вполне вероятно, что нервные клетки этого типа подчиняются внутренним программам роста, и эти программы помогут новым нейронам встроиться в существующие цепи и тем самым поспособствуют восстановлению нервной системы.

²⁸ Я благодарю Томаса Ллойда за рис. 2А и Натали Хэмилтон за рис. 2В–2D.

С момента рождения наше восприятие мира формируется в процессе постоянного разговора мозга с самим собой

Сэм Вонг

НОВОРОЖДЕННЫЙ НЕ ЗНАЕТ, в каком мире ему предстоит жить. На каком языке будут говорить окружающие его люди? Будет ли вознаграждено его упорство? Какая пища будет ему доступна? Многие потребности растущего ребенка связаны с условиями той среды, в которой он растет. Мозг адаптируется к широкому диапазону возможностей, потому что развивающиеся нейронные цепи в значительной степени определяются опытом. Ребенок, в мозге которого поначалу отсутствуют необходимые связи для обработки лавины поступающей информации, каким-то образом постепенно учится ее осмыслять.

С этой задачей мозг по большей части справляется самостоятельно – он сам себя «выстраивает»²⁹. Многим людям мозг представляется вычислительной машиной, которая запрограммирована на осмысление входящей информации и выработку соответствующих действий. Но сравнение с компьютером не учитывает, что мозг не вынимают из коробки уже готовым к работе³⁰. Для формирования мозга требуются годы, причем немалая часть «строительных работ» выполняется спустя значительное время после рождения. Этот процесс сопровождается грандиозными изменениями. Мозг новорожденного младенца весит приблизительно полкилограмма, и синаптических связей в нем в три раза меньше, чем в мозге взрослого человека. Более того, в течение первого года жизни эти связи, как правило, исчезают и заменяются новыми. Эти по большей части временные связи изначально не предназначены для выполнения задач, с которыми должен справляться двухлетний ребенок, не говоря уже о взрослом.

²⁹ S. Aamodt and S. Wang, *Welcome to Your Child's Brain: How the Mind Grows from Conception to College* (New York: Bloomsbury, 2011).

³⁰ Некоторые действия новорожденного носят автоматический характер. Например, младенец сразу после рождения умеет делать простейшие вещи, в том числе искать и сосать материнскую грудь.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «ЛитРес».

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

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