

Александр Владимирович Марков
Обезьяны, нейроны и душа
Серия «Династия (Corpus)»
Серия «Эволюция человека», книга 2

Текст предоставлен издательством
http://www.litres.ru/pages/biblio_book/?art=3744535
*Эволюция человека. В 2 кн. Кн. 2: Обезьяны, нейроны и душа/Александр Марков: Астрель,
CORPUS; Москва; 2011
ISBN 978-5-271-36294-1*

Аннотация

Новая книга Александра Маркова – это увлекательный рассказ о происхождении и устройстве человека, основанный на последних исследованиях в антропологии, генетике и психологии. Двухтомник «Эволюция человека» отвечает на многие вопросы, давно интересующие человека разумного. Что значит – быть человеком? Когда и почему мы стали людьми? В чем мы превосходим наших соседей по планете, а в чем – уступаем им? И как нам лучше использовать главное свое отличие и достоинство – огромный, сложно устроенный мозг? Один из способов – вдумчиво прочесть эту книгу.

Александр Марков – доктор биологических наук, ведущий научный сотрудник Палеонтологического института РАН. Его книга об эволюции живых существ «Рождение сложности» (2010) стала событием в научно-популярной литературе и получила широкое признание читателей.

Содержание

Глава 1	4
Скандальная тема	4
Логика	8
Сопереживание	11
Понимание чужих поступков	15
Орудийная деятельность	18
Бескорыстная помощь	22
Планы на будущее	25
Критическая самооценка и «метапознание»	26
Все дело в объеме рабочей памяти?	35
Глава 2	42
Универсальный аппарат для принятия решений	42
Чем мозг отличается от компьютера	46
Запоминающее устройство можно собрать из трех нейронов	48
Нейроны соревнуются за право запоминать	53
Воспоминания можно увидеть под микроскопом	56
...и считать с томограммы	60
Память закрепляется во сне	62
Речной рак принимает решение	67
Электромеханические устройства на мысленном управлении	72
Томография любви	77
Конец ознакомительного фрагмента.	80
Комментарии	

Александр Марков

Обезьяны, нейроны и душа

при участии Елены Наймарк

Глава 1

В поисках душевной грани

Скандальная тема

В заключительной главе дарвиновского «Происхождения видов» есть примечательный прогноз: «В будущем, я предвижу, откроется еще новое важное поле исследования. Психология будет прочно основана на необходимости приобретения каждого умственного качества и способности постепенным путем». Здесь Дарвин, по сути дела, предсказал развитие научной дисциплины, которую в наши дни называют *эволюционной психологией*.

Идеи Дарвина во многом опередили свое время, и развитие эволюционной психологии поначалу шло медленно. Из всех эволюционных идей именно идея об эволюционном происхождении человеческой психики вызывает самое ожесточенное сопротивление и у широкой публики, и даже у некоторых ученых. Но факты – вещь упрямая, и в конце концов эволюционный подход все-таки стал доминирующим в научной психологии и этологии человека. Однако ученые, работающие в этом направлении, до сих пор подвергаются яростным нападкам. Им приходится активно отстаивать свою позицию, и отголоски этой борьбы проникают даже на страницы серьезных научных изданий.

Один из номеров журнала *Nature* за 2007 год открывается редакционной статьей «Эволюция и мозг». Заявления, сделанные в этой статье, примечательны своей решительностью и кажущейся безапелляционностью. «При всем уважении к чувствам верующих, идею о том, что человек создан по образу Божию, можно уверенно отбросить», – пишет редакция одного из самых солидных и уважаемых научных журналов мира. Поводом для статьи стали, с одной стороны, антиэволюционные высказывания американских политиков, с другой – новейшие достижения психологов и нейробиологов.

Неужели все так серьезно? Неужели наука действительно должна настаивать на отрицании столь важного для многих верующих религиозного догмата? Нельзя ли тут найти какой-то компромисс?

Еще недавно многим казалось, что компромисс вполне достижим, причем сравнительно малой кровью. Перспективный путь для примирения науки с традиционными мифологическими представлениями о природе человека был намечен в XIX веке Альфредом Уоллесом (который, как известно, одновременно с Дарвином разработал теорию эволюции на основе отбора). Уоллес полагал, что эволюционная теория объясняет очень многое, но те умственные различия, которые наблюдаются между «человеком и животными», она объяснить не в силах. Можно допустить естественное эволюционное происхождение «животной стороны» человеческого существа, но «высшие» наши качества – умственные, моральные, эстетические – имеют иную природу.

Такая позиция еще до недавнего времени могла кое-как устроить даже закоренелых ученых-материалистов (хотя, конечно, далеко не всех), поскольку о природе человеческого

разума, памяти, сознания, эмоций строгими научными методами мало что удавалось выяснить. Но в последние десятилетия ситуация стала радикально меняться.

Конечно, наука и сегодня не может похвастаться полной расшифровкой всех тайн человеческой психики. Нерешенных проблем еще много. Главная из них в том, что нейробиологи не могут пока даже теоретически себе представить, как из нейронов и синапсов¹ может быть сделан воспринимающий субъект – «я». Но тенденция налицо: один за другим важнейшие аспекты человеческой личности, до самого последнего времени считавшиеся недосягаемыми для естественных наук (например, память, эмоции и даже мораль), уверенно переносятся в сферу материального, раскрывают свою физиологическую, клеточную, биохимическую природу и эволюционные корни.

Одним словом, сегодня наука уже вплотную подобралась к «самому святому» в человеке, и некоторые эксперты опасаются, что это может привести к новому обострению конфликта религии и науки. Этим начинают пользоваться в своих интересах политики, особенно в странах, где развитая демократия сочетается с высоким авторитетом религиозных конфессий, отличающихся непримиримостью по отношению к эволюционной биологии.

Вышеупомянутая редакционная статья в *Nature* была направлена в первую очередь против антиэволюционных демаршей сенатора Сэма Браунбека. Браунбек заявил в прессе, что человек – не эволюционная случайность, что в нем отражается «образ и подобие» наивысшего существа. «Аспекты эволюционной теории, совместимые с этой истиной, являются полезным дополнением к человеческим знаниям. Те же ее аспекты, которые подрывают эту истину, должны быть решительно отвергнуты как атеистическая теология, притворяющаяся наукой».

Редакция *Nature* приняла вызов. «И тело, и разум человека произошли путем эволюции от более ранних приматов, – утверждает в статье. – Способ человеческого мышления свидетельствует о таком происхождении столь же убедительно, как и строение и работа конечностей, иммунной системы или колбочек глаза». Речь идет не только о механизмах работы нейронов, но и о таких «высших» психических проявлениях, как мораль. В том, как эмоции управляют нашей моралью, редакция *Nature* видит веское доказательство эволюционного происхождения того и другого. «То, что человеческий разум является продуктом эволюции, – не атеистическая теология. Это неоспоримый факт», – утверждает в статье.

Можно ли сегодня всерьез относиться к идее о том, что человеческий разум есть «отражение» разума божественного? По мнению редакции, крайне маловероятно, что существо, способное создать Вселенную, может обладать разумом, хотя бы отдаленно похожим на наш. Ведь наш-то разум устроен в точности так, как и должен быть устроен разум, развившийся эволюционным путем у «прямоходящей обезьяны, приспособившейся к жизни в маленьких, тесно сплоченных коллективах в условиях африканской саванны» (подробнее о несовершенстве нашего разума мы поговорим в главе «Жертвы эволюции»).

В статье отмечается, что в современной антропологии, эволюционной биологии и нейробиологии остается много нерешенных проблем, но это вовсе не означает, что данные этих наук могут быть отвергнуты на основании одних лишь религиозных верований. Современное научное видение природы человека может вызывать чувство дискомфорта и неудовлетворенности², но это не делает его менее научным и менее достоверным. По мнению

¹ *Синапс* – зона контакта между двумя нервными клетками (нейронами). Синапсы служат для передачи сигналов от одних нейронов к другим. Мы подробно познакомимся с синапсами в следующей главе.

² На самом деле эти чувства возникают только с непривычки. Так всегда бывает при радикальной смене мировоззрения. Осознание того, что Земля не является центром Вселенной, тоже было сопряжено с известными трудностями. Но стоит лишь получше осмыслить складывающуюся на основе научных данных новую картину, и начинаешь понимать, что в ней можно найти ничуть не меньше удовлетворения и комфорта, чем в традиционных идеалистических воззрениях. Мы еще вернемся к этой теме.

редакции *Nature*, любые серьезные попытки обобщения и систематизации имеющихся данных сегодня могут быть основаны только на идее о происхождении человеческого разума в ходе биологической и культурной эволюции, без ссылок на божественное творение.

На чем основана такая уверенность? Она основана на совокупности данных нейробиологии, генетики поведения, этологии, экспериментальной психологии и смежных дисциплин. Можно выделить четыре основных идеи, или вывода, которые по мере развития всех этих наук становятся все более очевидными и бесспорными.

Во-первых, у животных в той или иной форме обнаружены многие – чуть ли не все – аспекты мышления и поведения, которые традиционно считались «чисто человеческими». Непреодолимой пропасти между человеком и другими животными в сфере психологии нет – точно так же, как нет ее в строении скелета, кишечника и прочих органов. Во многом прав был Дарвин, когда в книге «Происхождение человека и половой отбор» прямо написал о том, что различия между мышлением человека и животных имеют не столько качественный, сколько количественный характер (мысль по тем временам совершенно крамольная!).

Во-вторых, все аспекты нашей психики, включая и самые «высшие», такие как мораль, имеют вполне материальную нейрофизиологическую основу. Подобно тому как мы можем сказать, что глаз – это орган зрения, в нашем мозге есть и специализированные отделы, ответственные за ключевые психические функции³. Если мы согласны с тем, что орган зрения, глаз, мог развиваться эволюционным путем, то с какой стати отрицать такую возможность для отделов мозга, являющихся по сути «органами речи» или «органами совести»?

В третьих, особенности нашей психики зависят от генов⁴. Свойства души⁵ определяются не только воспитанием, но и врожденными свойствами мозга, генетически обусловленными предрасположенностями к тем или иным чувствам, эмоциям, пристрастиям, идеям (мы поговорим об этом подробно в главе «Генетика души»). А поскольку гены действительно влияют на все это, следовательно, эти признаки вполне могли развиваться эволюционным путем, так же как и любые другие признаки, по которым в популяции есть (или была в прошлом) наследственная изменчивость.

В четвертых, эволюционные модели происхождения разных аспектов нашей психики позволяют делать предсказания, то есть выводить проверяемые следствия, которые затем проверяются в ходе специальных экспериментов. Результаты таких проверок, как правило, оказываются положительными. Это, наверное, самый важный источник уверенности ученых в адекватности эволюционного подхода. С каждым подтвердившимся предсказанием вероятность ошибочности исходной теории снижается, и в настоящее время она уже практически неотличима от нуля.

В этой главе мы поговорим о фактах, относящихся к первому пункту списка. Для этого мы предпримем несколько экскурсий в мир «нечеловеческих животных» и познакомимся с фактами, указывающими на наличие у них многих способностей, традиционно считавшихся «чисто человеческими».

³ Здесь есть доля преувеличения. Распределение функций по отделам мозга довольно пластично, при необходимости одни отделы могут брать на себя работу, обычно выполняемую другими. Тем не менее эволюция этих отделов – например, увеличение или уменьшение их относительного размера – определялась в первую очередь их *основными* функциями. Оставшись без рук, человек может научиться рисовать ногами, но все-таки наши ноги с эволюционной точки зрения являются «органами ходьбы», а не рисования.

⁴ Не определяются генами, а именно зависят. Никакого жесткого генетического детерминизма! Гены вообще влияют на фенотип лишь вероятностным образом. Особи с идентичными геномами, даже выращенные в одинаковых условиях, все равно будут чуть-чуть разные. Влияние генов на психические и поведенческие признаки еще менее детерминистично, чем на признаки морфологические и физиологические (см. главу «Генетика души»).

⁵ Я пользуюсь словами «психика» и «душа» как синонимами. Просто не вижу разницы.

По этой теме существует обширнейшая литература, в том числе на русском языке, в том числе популярная. Заинтересованным читателям я бы посоветовал обратить внимание на книги З. А. Зориной и А. А. Смирновой «О чем рассказали „говорящие“ обезьяны: Способны ли высшие животные оперировать символами?» (2006), Ж. И. Резниковой «Интеллект и язык животных и человека. Основы когнитивной этологии» (2005), З. А. Зориной и И. И. Полетаевой «Элементарное мышление животных» (2002). В списке рекомендуемой литературы в конце книги указан еще ряд изданий, в которых данная тема раскрыта гораздо полнее, чем мы можем себе позволить в рамках одной небольшой главы. Мы не будем даже пытаться объять необъятное и ограничимся подборкой интересных примеров из исследований последних лет.

Логика

6

Изучая ритуалы у животных и птиц, Конрад Лоренц описал формирование ассоциативных связей, на которых потом животное строит свое поведение. Если два события происходят одновременно, то у животного формируется связь между двумя стимулами, даже если они ничем, кроме хронологического совпадения, не связаны. Так может возникнуть внешне бессмысленный ритуал, оправданный, однако, случившимися когда-то яркими совпадениями.

Считается, что, в отличие от других животных, человек способен строить свое мышление на причинных связях, а не ассоциативных, то есть человек из множества совпадений способен выделить истинную причину события. Философы и психологи указывали на это свойство мышления как на главный барьер между человеческим и животным разумом. Однако этологам удалось экспериментально показать, что этот барьер не так уж непроходим. Выяснилось, что не только обезьяны, но и животные, стоящие на более низких ступенях интеллектуального развития, умеют отличать причинно-следственные связи от случайных ассоциаций.

Одно из таких исследований было проведено на крысах (*Blaisdell et al., 2006*). Сначала крысам включали свет, а вслед за этим раздавался гудок. На следующем этапе обучения включали свет, а вслед за этим в кормушке появлялась награда – сахарный сиропчик. Таким образом, экспериментаторы создали для крыс ситуацию, которую было бы разумно (при умении разбираться в причинно-следственных связях) интерпретировать так: «Свет – причина звука, и он же – причина пищи».

Если крысы не способны различать причины и следствия, у них в голове должны были сформироваться только ассоциации: света со звуком, пищи со светом. Может быть, через посредство ассоциации со светом возникла бы также и третья ассоциация – пищи со звуком. Действительно, после подачи гудка крысы тыкались носом в кормушку в поисках награды. Это еще ни о чем не говорило: такое поведение можно объяснить как пониманием причин, так и формированием опосредованной ассоциации.

Затем задачу усложнили. Крысам предоставили возможность самим заведовать звуком – в клетке появился специальный звуковой рычаг. И что же? Если крыса нажимала на звуковой рычаг самостоятельно, то после этого она не проверяла, появился ли сироп. Но если сигнал раздавался без вмешательства крысы, она сразу бежала к кормушке.

Вывод напрашивается сам собой: крысы мыслят не по ассоциации. Если бы работала простая ассоциативная связь «звук – свет – пища», то крысе было бы все равно, по какой причине раздался звук. Звук просто наводил бы ее на мысль о свете, а свет связан с пищей, и крыса шла бы к кормушке искать сироп. Но она оказалась в состоянии понять, что звук, который она сама вызвала с помощью рычага, не приведет к появлению сиропа. Потому что причиной награды является свет, а света не было; причина раздавшегося звука была крысе известна, она сама нажала на рычаг. Поэтому нет никаких оснований предполагать, что свет все-таки был, но она его почему-то не заметила. Другое дело, если звук раздался сам по себе, без помощи крысы. В этом случае крыса не знала, в чем причина звука, и могла предположить, что причиной был незамеченный свет. А свет, как известно, приводит к появлению сиропа. Нужно проверить.

Более полное представление о понимании крысами причинно-следственных связей дал второй эксперимент. На этот раз у крыс изначально тренировали восприятие цепочки из

⁶ Раздел написан в соавторстве с Еленой Наймарк.

трех событий: сначала давали звук, затем включали свет, затем в кормушке появлялся сахар. То есть была сформирована модель причинной связи «звук – причина света, свет – причина пищи». Эту формулу можно мысленно сократить, выкинув бесполезный для крысы свет, и прийти к выводу, что звук прямо или опосредованно может приводить к появлению пищи. Когда тренировка закончилась, крыс снова поместили в клетку со звуковым рычагом. На этот раз крысы одинаково активно начинали поиски пищи и в ответ на звук, данный экспериментатором, и в ответ на самостоятельно индуцированный звук. По мнению исследователей, это значит, что крысы понимали: раз звук сам является *причиной* пищи (а не побочным следствием ее истинной причины, как в первом опыте), то неважно, кто вызвал звук – экспериментаторы или сама крыса. Осознав причинно-следственные связи, крысы пытались заставить пищу появиться, нажимая на звуковой рычаг.

Такую модель принятия решений, как считают исследователи, нельзя интерпретировать с позиций ассоциативного мышления. Это не ассоциации, а настоящая логика.

Да что крысы! Зачатки логики удалось обнаружить даже у рыб.

Одним из важных компонентов мышления считается способность делать транзитивные логические выводы. Так называют умозаключения о связях между объектами, сделанные на основе косвенных данных. Например, транзитивным является следующий вывод: «если $A > B$ и $B > C$, то $A > C$ ». Способность к транзитивной логике вначале была описана как один из рубежей в умственном развитии детей, затем была зарегистрирована у обезьян, крыс и некоторых птиц (голубей, ворон) – то есть у млекопитающих и птиц, в сообразительности которых теперь уже мало кто сомневается.

Недавно этологи из Стэнфордского университета (США) сумели показать, что рыбы тоже владеют транзитивной логикой (*Grosenick et al., 2007*). Ученые ставили опыты на аквариумной рыбке *Astatotilapia burtoni*, самцы которой отличаются ярко выраженным территориальным поведением и агрессивностью. Они отстаивают свое право на владение территорией в непрерывных поединках с другими самцами. Самец, раз за разом терпящий поражение в этих схватках, не имеет шансов обзавестись семьей. Неудачники впадают в глубокую тоску: они теряют характерную яркую окраску, а заодно и интерес к противоположному полу. Впрочем, все еще может измениться: природные местообитания аstatотилипии отличаются нестабильностью, и после очередной катастрофы местного масштаба, вызванной колебаниями уровня воды или прогулкой стада гиппопотамов, самцам часто приходится делить участки заново.

Ученые предположили, что рыбки должны уметь определять силу потенциального противника. Наибольшие шансы на успех (и следовательно, на продолжение рода) будет иметь тот самец, который сумеет благоразумно уклониться от схваток с заведомо более сильными соперниками и завоюет себе участок, потеснив слабейших. Предварительные опыты подтвердили это предположение. Оказалось, что самцы аstatотилипии действительно предпочитают держаться подальше от сильных соперников, причем о силе конкурента рыбы судят, в частности, по результатам его схваток с другими самцами.

Например, самцу-наблюдателю показывали через стекло бой двух других самцов, в котором, естественно, кто-то побеждал, а кто-то проигрывал. Затем «наблюдателя» сажали в центральный отсек аквариума, разделенного на три части стеклянными перегородками, а в два крайних отсека сажали победителя и побежденного. «Наблюдатель» в такой ситуации больше времени проводил в той половине своего отсека, которая граничила с отсеком проигравшего самца.

Такая особенность поведения делает аstatотилипию замечательным объектом для изучения рыбьего мышления. Ученые поставили простой и красивый эксперимент, чтобы выяснить, способны ли рыбы к транзитивной логике.

Первый этап эксперимента состоял в «обучении» самцов. Самец-наблюдатель последовательно наблюдал схватки, в которых участвовали пять других самцов (a, b, c, d, e). Все самцы были примерно одинаковыми по размеру и силе. В такой ситуации экспериментаторам было очень легко контролировать исход поединка. Рыбки яростно защищают территорию, которую считают своей. Поэтому при равных силах побеждает всегда «хозяин» данного отсека аквариума, а тот, кого к нему подсадили, обречен на поражение.

Наблюдателю давали посмотреть четыре поединка: в первом из них самец a побеждал самца b , затем b побеждал c , $c - d$ и, наконец, d одерживал верх над e . Таким образом экспериментаторы пытались внушить наблюдателю, что пять соперников по своей силе располагаются в следующем порядке: $a > b > c > d > e$. Всего таким способом было «обучено» восемь самцов-наблюдателей.

Чтобы проверить, какие выводы сделал наблюдатель из увиденного, ученые воспользовались методикой, описанной выше, то есть предлагали наблюдателю «на выбор» двух самцов и смотрели, к кому он будет держаться ближе.

Сначала наблюдателям предлагали сделать выбор между a и e , то есть крайними членами ряда. Обученные рыбки безошибочно сочли слабейшим самца e и держались ближе к нему, чем к a . Однако этот результат еще не доказывал способности рыб к транзитивной логике. Хотя наблюдатели не видели схватки непосредственно между a и e , первого из этих самцов они видели только победителем, а второго – только побежденным. Это вполне могло стать основой для правильного вывода даже без осмысления всей цепочки побед и поражений.

Критическим моментом исследования был опыт, в котором наблюдателям предложили сделать выбор между самцами b и d . Каждого из этих самцов наблюдатели видели в двух поединках, и на счету у каждого были одна победа и одно поражение. Тут уж без транзитивной логики никак нельзя вычислить, кто сильнее. Тем не менее рыбы не ошиблись: они держались ближе к d , считая его слабейшим.

Общая схема этого эксперимента в точности соответствует классическим тестам на транзитивную логику, применяемым при исследовании умственных способностей детей. Самое удивительное, что рыбы успешно справились с тестом, с которым человеческие дети, как правило, начинают справляться лишь в возрасте 4–5 лет! Может показаться невероятным, что четырехлетние дети по каким-то аспектам умственного развития уступают рыбам. Однако транзитивная логика действительно относится к числу способностей, развивающихся у людей довольно поздно (*Piaget, 1971*). Это можно понять: для *Homo sapiens* данная способность, по-видимому, не так важна, как для самцов астатотилипий. Мы уже упоминали о том, что наше мышление далеко не универсально, что мы уступаем, например, сойкам по способности запоминать точки на местности, а крысам – по умению находить выход из лабиринта (*Резникова, 2009*). В данном случае мы просто столкнулись еще с одним примером несовершенства нашего мышления.

Как и целый ряд других этологических исследований последних лет, эта работа подтвердила две важные идеи. Во-первых, мы по-прежнему сильно недооцениваем умственные способности животных и преувеличиваем собственную уникальность. Во-вторых, для того чтобы понять, как думают животные, самое главное – это удачно подобрать объект и правильно спланировать эксперимент. Многие опыты подобного рода в прошлом давали отрицательные результаты только потому, что подопытное животное не было по-настоящему заинтересовано в успехе либо ожидаемое экспериментаторами «разумное» поведение противоречило каким-то инстинктам, побуждениям или соображениям животного, о которых экспериментаторы не подозревали.

Сопереживание

Способность к сопереживанию (эмпатии) тоже когда-то считалась чисто человеческим свойством. Сегодня существование эмпатии у высших приматов уже признано большинством исследователей, и есть данные, указывающие на зачатки этой способности у других млекопитающих, а также у птиц. Например, было показано, что если крыса, наблюдающая страдания сородича, имеет возможность облегчить его участь, то она это, как правило, делает. Однако ее мотивация при этом неочевидна: может быть, она и не понимает, что товарищу больно, а просто хочет избавиться от раздражающего лично ее фактора в виде визжащего и дергающегося соплеменника.

Зеркальные нейроны

Предполагают, что важную роль в эмпатии могут играть так называемые зеркальные нейроны, открытые у обезьян более 20 лет назад. Так называют клетки мозга, которые возбуждаются в двух ситуациях: когда само животное совершает какое-то действие (или испытывает эмоцию) и когда оно видит, что кто-то другой совершает такое же действие (или переживает такую же эмоцию). Возможно, система зеркальных нейронов вносит вклад в понимание животными мотивов поведения сородичей (то есть в «теорию ума», о которой пойдет речь ниже). Читателям, желающим побольше узнать о зеркальных нейронах, рекомендую недавно переведенную на русский язык книгу И. Бауэра «Почему я чувствую, что чувствуешь ты. Интуитивная коммуникация и секрет зеркальных нейронов» (2009).

Сначала вокруг зеркальных нейронов был поднят большой шум, но потом к ним все как-то привыкли. Возможно, некоторое снижение уровня восторга по поводу зеркальных нейронов, наблюдающееся в последние годы, связано с осознанием одного из базовых принципов работы мозга, который станет нам ясен из следующей главы, где мы обсудим устройство памяти.

Но я сейчас немного забегу вперед и все-таки скажу, что это за принцип. Суть его в том, что мысль о переживании сделана физически «из того же теста», что и само переживание. Когда мы о чем-то думаем, что-то себе представляем или вспоминаем, в мозге возбуждаются многие из тех нейронов, которые участвовали в непосредственном восприятии или переживании этого «чего-то».

Рисунок возбуждения нейронов мозга в ответ на стимул (например, на боль или на замеченный под кустом гриб) – это модель реальности, которую мозг создает на основе сигналов, приходящих от органов чувств. Воспоминание о данном стимуле представляет собой повторную активацию этой же самой модели.

Те же нейроны, которые возбудились при виде гриба, будут возбуждаться и при воспоминании о нем. Разумеется, не в полном составе: возбуждение нейронов, реагирующих на новизну, будет слабее, стимула к действию – нагнуться и срезать – тоже не возникнет. Все-таки мы, как правило, способны отличить воображаемую реальность от непосредственно воспринимаемой.

Но «информативная» часть у обоих переживаний одна и та же.

На нейробиологическом уровне она представляет собой возбуждение одних и тех же нейронов.

Когда с этой идеей свыкаешься, начинаешь понимать, что мозг вряд ли смог бы работать как-то иначе. Зачем создавать и хранить две одинаковые мысленные модели одного и того же?

Это расточительно, неэффективно и чревато путаницей. Конечно, модель должна быть одна. Из этого следует, что зеркальных нейронов просто не может не быть у животных, способных хотя бы приблизительно понять, что чувствует соплеменник.

В 2006 году сотрудники психологического факультета и Центра исследований боли Университета Макгилла (Монреаль, Канада) провели серию экспериментов с целью выявления способности к эмпатии у мышей (*Langford et al., 2006*). Они исходили из предположения, что если такая способность у мышей есть, то вид страдающего сородича должен влиять на восприятие мышами собственных болевых ощущений.

Мышей мучили тремя разными способами, причем в зависимости от вида истязания различной была и реакция на боль. Во всех опытах страдания животных были умеренными и не представляли угрозы для здоровья. Мышам делали инъекции уксусной кислоты (реакция на боль – подергивания), формалина (реакция – вылизывание больного места) и направляли на лапки обжигающий тепловой луч (сила реакции на боль оценивалась по скорости отдергивания лапок).

В первой серии опытов мышей сажали попарно в контейнеры из оргстекла и делали болезненные инъекции либо одной из них, либо обеим. Оказалось, что мыши сильнее реагируют на собственную боль, если видят, что их сосед по камере тоже страдает. Однако этот эффект наблюдался не всегда, а лишь в том случае, если подопытные мыши были знакомы друг с другом, то есть до начала эксперимента содержались в одной клетке не менее двух недель. Страдания незнакомцев не находили отклика в мышинной душе и никак не влияли на их «болевое поведение».

Было также замечено, что болезненные подергивания, спровоцированные инъекцией уксуса, у подопытных мышей синхронизируются. Одновременные судороги наблюдались чаще, чем диктуется простой вероятностью. Эта синхронизация была сильнее выражена у знакомых мышей по сравнению с незнакомыми.

Ученые попытались выяснить, при помощи каких органов чувств мыши получают информацию о страданиях соседа. Для этого использовались глухие мыши; мыши, у которых обонятельный эпителий был разрушен при помощи сульфата цинка; применялись также разные прозрачные и непрозрачные перегородки. Оказалось, что мыши, лишенные возможности слышать, обонять или прикасаться к товарищу по несчастью, все равно понимали, что он страдает. Они переставали это понимать, только если их разделяла непрозрачная перегородка, то есть одновременно были отключены тактильный и зрительный каналы, при сохранении возможности обмена информацией посредством звуков и запахов. Из этого исследователи сделали вывод, что мыши судят о страданиях соседа преимущественно на основе зрительной информации.

Было также обнаружено, что реакция на собственную боль значительно уменьшается у самцов, находящихся в одной камере с не испытывающим боли незнакомцем. Вероятно, присутствие потенциального соперника мобилизует силы зверька и отвлекает его от болезненных ощущений.

В другой серии опытов мышам кололи формалин: одним маленькую дозу, другим большую. Оказалось, что мыши, получившие маленькую дозу, облизывались чаще в том случае, если вместе с ними находился знакомый зверек, получивший большую дозу. Напротив, мышь, получившая большую дозу, облизывалась реже, если ее товарищ по камере получил маленькую дозу. Страдания незнакомцев, как и в опытах с уксусом, не оказывали влияния на болевое поведение мышей.

В последней серии экспериментов ученые пытались доказать, что наблюдаемые эффекты не связаны с подражанием. Ведь можно было бы предположить, что мыши обливаются или дергаются вовсе не потому, что осознают боль соседа и из-за этого острее воспринимают свою. Может быть, они просто зачем-то подражают его действиям. Мышам

кололи уксус и проверяли силу реакции на обжигающий луч. Оказалось, что мышцы быстрее отдергивают лапки от луча, если их сосед корчится из-за введенного уксуса; точно такое же повышение чувствительности к высокой температуре наблюдалось и при введении уксуса самой подопытной мыши. Таким образом, ощущение как своей, так и чужой боли обостряет восприятие болевых стимулов совершенно иной природы. Значит, дело тут не в подражании. Опять же, как и в остальных опытах, на поведение мышей влияли только страдания знакомых животных.

Физиологические механизмы эмпатии сейчас активно изучаются в основном на людях. Однако возможности экспериментов на людях сильно ограничены (к счастью), поэтому открытие хорошей «животной модели», не защищенной международными конвенциями о правах, выводит исследователей на широкий оперативный простор.

Тот факт, что мыши чувствительны только к страданиям знакомых мышей, наводит на мысль, что способность к эмпатии могла развиваться как одна из адаптаций к общественному образу жизни. Она может играть особенно важную роль во взаимоотношениях между родителями и детенышами. Чувствительность к эмоциональному состоянию, понимание желаний и намерений детеныша могли бы помочь матери обеспечить потомству наилучший уход, защиту и воспитание. Хотя в принципе тут можно обойтись и одними врожденными или выученными поведенческими реакциями, без эмоционального отклика – как это, вероятно, происходит у насекомых, заботящихся о своем потомстве.

Эксперименты, проведенные биологами из Бристольского и Лондонского университетов, показали, что ключевые элементы эмпатии есть и у домашних кур (*Edgar et al., 2011*). Давно известно, что куры-матери внимательны к поведению своих цыплят. Например, они целенаправленно учат их клевать «правильные» (съедобные) объекты и меняют свое поведение, когда видят, что цыплята клюют что-то несъедобное. Это говорит о *когнитивной* чувствительности курицы к состоянию цыпленка, но не обязательно о ее *эмоциональной* вовлеченности: курица понимает, что происходит с цыпленком, но переживает ли она за него?

Чтобы хоть немного приблизиться к ответу на этот трудноразрешимый вопрос, авторы изучили не только поведенческие, но и физиологические реакции кур, видящих, как их цыпленок подвергается слабому стрессовому воздействию. В эксперименте приняли участие 14 кур со своими выводками. Каждую мамашу и цыплят сначала долго приучали к экспериментальной обстановке, чтобы она не вызывала у них беспокойства. Опыты проводились в деревянном ящике, разделенном пополам перегородкой из оргстекла. К курице ремешками приматывали прибор для измерения пульса; при помощи тепловизора регистрировалась температура глаз и гребешка. Использовались четыре экспериментальные ситуации:

1. контроль – курица и цыплята в течение 20 минут находились в своих отсеках и не подвергались никаким воздействиям;
2. первые 10 минут ничего не происходило, а затем на цыплят направляли струю воздуха. Это продолжалось одну секунду, затем следовала 30-секундная пауза, после чего на цыплят снова дули одну секунду, и так далее;
3. все было так же, как во втором случае, только струю воздуха направляли не на цыплят, а на курицу;
4. птицы слышали шипение воздушной струи, вырывающейся из контейнера со сжатым воздухом, но струю ни на кого не направляли.

Каждая курица с выводком в течение двух недель была протестирована по два раза во всех четырех ситуациях. В каждом тесте сравнивались поведенческие и физиологические параметры в течение первого и второго 10-минутных периодов («до воздействия» и «во время воздействия»).

Поведение курицы в контрольных ситуациях 1 и 4 было одинаковым в оба периода. В ситуациях 2 и 3 курица в течение второй десятиминутки («во время воздействия») достоверно меньше времени тратила на чистку перьев, чаще принимала настороженную позу и в целом издавала больше звуков, однако специфическое материнское квохтанье, которым курица подзывает к себе цыплят, усиливалось только в ситуации 2, когда ветер дул на птенцов. Квохтанье выполняет как минимум две функции: во-первых, оно помогает матери увести цыплят от опасности, во-вторых, ранее было показано, что эти звуки способствуют обучению: цыплята лучше запоминают те ситуации и события, которые сопровождаются материнским квохтаньем.

Пульс курицы достоверно учащался только в ситуации 2 и оставался ровным во всех остальных случаях. Температура глаз снижалась в ситуациях 2 и 3, гребешка – только в ситуации 3. Как и учащение пульса, охлаждение глаз и гребешка является признаком стресса (периферические сосуды сужаются, что ведет к оттоку крови от периферии к мышцам и внутренним органам).

Таким образом, куры продемонстрировали характерный набор физиологических и поведенческих реакций на стресс и испуг как в ситуации 3, когда ветер дул на них самих, так и в ситуации 2, когда ветер дул на цыплят. Самое интересное, что учащение сердцебиения и материнского квохтанья было отмечено только в ситуации 2, тогда как охлаждение гребешка наблюдалось только в ситуации 3. Авторы отмечают, что эти различия нельзя объяснить реакцией матери на звуки, издаваемые цыплятами, потому что цыплята в ситуации 2 пищали не больше, чем во всех остальных ситуациях. Кроме того, не было выявлено никаких корреляций между цыплячьим писком и поведением матери.

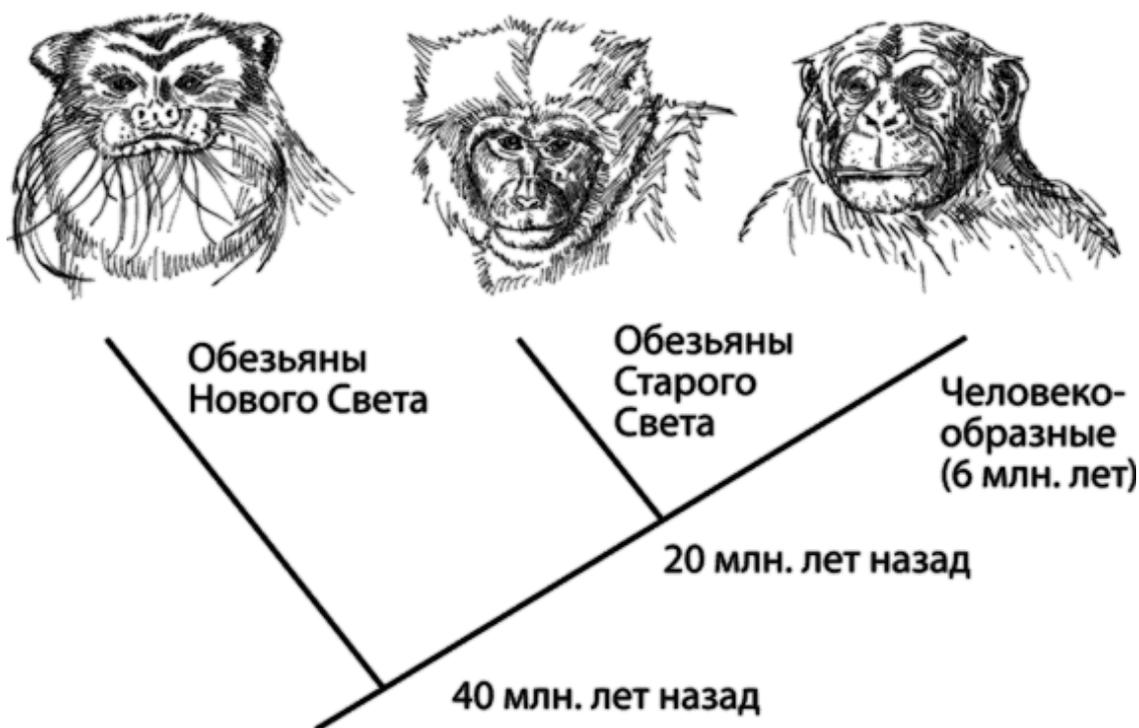
По-видимому, все это означает, что у кур имеется специфическая эмоциональная реакция на опасность, угрожающую потомству, причем она отличается от реакции на точно такие же стимулы, направленные на саму птицу. Это можно рассматривать как довод в пользу того, что куры обладают способностью к эмпатии или по крайней мере некоторыми ее ключевыми элементами.

Чтобы окончательно доказать, что неприятная ситуация, в которую попали птенцы, вызывает у курицы-матери отрицательные эмоции (а не нейтральные реакции, такие как «интерес» или «повышенное внимание»), следовало бы проследить за работой ее мозга. Пока же нейробиологи не подключились к этим исследованиям, приходится довольствоваться косвенными аргументами. В частности, авторы отмечают, что куры целенаправленно избегают ситуаций, на которые они реагируют так же, как на струю воздуха в эксперименте. Следовательно, эти реакции скорее всего связаны с отрицательными эмоциями.

Понимание чужих поступков

В 2002 году были опубликованы результаты изящных экспериментов, показавших, что уже в возрасте 14 месяцев дети способны критически анализировать чужое поведение и отличать осмысленные, целенаправленные поступки от случайных или вынужденных (*Gergely et al., 2002*). Экспериментатор на глазах у детей включал лампочку, нажимая на кнопку головой, хотя мог сделать это руками. Дети копировали это действие: когда им предоставлялась такая возможность, они тоже нажимали на кнопку головой – очевидно, полагая, что у этого способа нажатия на кнопку есть какие-то важные преимущества, раз взрослый человек так поступает. Однако если у экспериментатора, когда он нажимал головой на кнопку, были чем-то заняты руки, то дети не копировали слепо его действия, а нажимали на кнопку рукой. Очевидно, они понимали, что взрослый воспользовался головой лишь потому, что руки у него были заняты. Следовательно, малыши не просто подражают взрослым, а анализируют их поведение, учитывая при этом всю ситуацию.

Для такого анализа нужно обладать тем, что в англоязычной литературе называют *theory of mind* («теория ума»), то есть пониманием того, что другое существо тоже что-то соображает, что его поступки преследуют определенную цель и обусловлены некими рациональными мотивами⁷. Традиционно считалось, что такое понимание присуще только человеку.



Обезьяны, принявшие участие в эксперименте (слева направо): тамарин (*Saguinus*), макака (*Macaca*) и шимпанзе (*Pan*). По рисунку из Wood et al., 2007.

⁷ Иногда это похоже не на «понимание», а скорее на некое предубеждение: если мы не можем предсказать поведение объекта на основе наблюдаемых (или легко вычисляемых) внешних сил, мы считаем, что это субъект, у него есть цель и рациональные мотивы. Те, у кого компьютер часто глючит, склонны с ним разговаривать. Глючит – значит, непредсказуем, непредсказуем – значит, имеет цель и мотивы и в принципе может быть доступен увещаниям. Конечно, подобные «рассуждения» обычно осуществляются на бессознательном уровне (*С. А. Бурлак, личное сообщение*).

Американские этологи провели эксперименты с тремя видами обезьян – тамарином, макакой резусом и шимпанзе, – чтобы проверить, нет ли у этих обезьян такой же способности к неформальному анализу чужих поступков, какая была выявлена у 14-месячных детей (Wood et al., 2007). В первой серии экспериментов животных приучали выбирать из двух непрозрачных стаканчиков тот, в котором лежит конфета. Сначала угощение клали в один из стаканчиков на глазах у обезьяны, придвигали к ней оба стаканчика и смотрели, какой она выберет. Если она брала пустой стаканчик, то конфеты не получала. Это был еще не эксперимент, а подготовка к эксперименту.

Когда обезьяны усваивали правила игры (они это понимали очень быстро, практически сразу), ученые приступали к основной части опыта. Обезьяне показывали два стаканчика, потом закрывали их загородкой и делали вид, что кладут в один из стаканчиков конфету, но обезьяна не могла видеть, в какой из двух. Потом загородку убирали, и экспериментатор совершал одно из двух действий: «случайное» либо «целенаправленное». В первом случае он прикасался к одному из стаканчиков тыльной стороной ладони, а потом убирал руку. Во втором случае он брал один из стаканчиков пальцами, не поднимая его, а потом точно так же убирал руку. После этого оба стаканчика пододвигали к обезьяне и смотрели, какой она выберет.

Выяснилось, что все три вида обезьян четко отличают «случайный» жест экспериментатора от «целенаправленного». В первом случае они с равной вероятностью брали любой из двух стаканчиков. Очевидно, прикосновение тыльной стороной ладони ими интерпретировалось как ничего не значащее. Во втором случае они брали тот стаканчик, который экспериментатор хватал пальцами, в три раза чаще (то есть примерно в 75 % случаев). Авторы предполагают, что этот жест воспринимался обезьянами либо как попытка взять стаканчик, либо как указание, подсказка, адресованная лично им, – но, во всяком случае, как целенаправленный и осмысленный поступок.

Таким образом, обезьяны отличают в чужом поведении случайные действия от целенаправленных. Но оставался открытым вопрос: как они это делают? Может быть, они интерпретируют чужое поведение поверхностно, формально: например, акт хватания считается «важным», а прикосновение тыльной стороной ладони – «неважным». В этом случае результат можно объяснить и без «теории ума». Чтобы это проверить, была поставлена вторая серия экспериментов.

Здесь все было устроено в общем так же, но экспериментатор прикасался к стаканчику не ладонью, а локтем. Ни один из исследованных видов обезьян никогда не пользуется локтями, чтобы на что-то указывать или тем более что-то брать. Поэтому для правильной интерпретации такого жеста одними формальными методами не обойтись – нужно пошевелить мозгами. В этой серии экспериментов тоже применялось два вида действия: «целенаправленное» и «случайное». В первом случае у экспериментатора руки были заняты. Обезьяна должна была сообразить, что человек потому и пользуется локтем, что у него заняты руки, и жест должен что-то значить. Во втором случае руки экспериментатора были свободны. Обезьяне нужно было понять, что если бы человек хотел взять стаканчик или указать на него, то сделал бы это рукой – ведь она свободна, и поэтому весь жест можно интерпретировать как случайное, бессмысленное действие.

Все три вида обезьян правильно разобрались в ситуации: если руки у человека были свободны, они брали любой из стаканчиков наугад, если заняты – выбирали тот, на который человек им указал локтем.

Авторы сделали вывод, что все исследованные обезьяны способны анализировать чужие поступки, в том числе нестандартные, с учетом конкретной ситуации, и справляются с этим не хуже четырнадцатимесячных детей. Без «теории ума», по мнению исследователей, тут не обойтись.

Поскольку обезьяны Нового Света, к которым относится тамарин, отделились от обезьян Старого Света, по некоторым оценкам, около 40 млн лет назад, авторы заключили, что способность понимать мотивы чужих поступков появилась у приматов уже очень давно. Это умение, скорее всего, развилось в связи с общественным образом жизни: трудно выжить в тесном коллективе таких высокоразвитых существ, как обезьяны, если не понимаешь мотивации поведения соплеменников.

Орудийная деятельность

Давно прошли те времена, когда изготовление и использование орудий считались уникальными свойствами человека. Сегодня известно множество видов животных, использующих орудия в повседневной жизни, причем в ход идут как неизменные природные объекты, так и обработанные (например, палки с удаленными сучками и листьями).

Людам, исследующим поведение животных, избавиться от антропоцентрических оценок трудно. Возможно, этим отчасти объясняется устоявшееся представление о том, что орудийная деятельность является лучшим показателем интеллектуального уровня (когнитивных возможностей) в целом. Еще бы, ведь мы, люди, достигли самых выдающихся успехов именно в этой области. Разные эксперты придерживаются разных точек зрения о том, насколько справедлива такая оценка. Например, один из ведущих российских этологов Ж. И. Резникова полагает, что сложная орудийная деятельность не обязательно говорит о большом уме (*Резникова, 2006*). Другие ведущие этологи расставляют акценты несколько иначе (*Зорина, Полетаева, 2002*).

Орудийная деятельность особенно широко распространена у млекопитающих, причем отнюдь не только у обезьян. Слоны отгоняют ветками мух, а если сломанная ветка слишком велика, они кладут ее на землю и, придерживая ногой, отрывают хоботом часть нужного размера. Некоторые грызуны используют камешки для разрыхления и отгребания почвы при рытье нор. Каланы (морские выдры) отдирают прикрепленных к скалам моллюсков при помощи крупных камней – «молотков», а другие, менее крупные камни используют для разбивания раковин: лежа на спине на поверхности воды, зверь кладет камень-наковальню на грудь и колотит по нему раковиной. Медведи способны сбивать плоды с деревьев при помощи палок; зафиксировано использование камней и глыб льда белыми медведями для убийства тюленей.

Много данных накоплено и об орудийном поведении у птиц. Новокаледонские галки достают насекомых из трещин в коре при помощи разнообразных приспособлений, изготавливаемых самими птицами из прочных листьев и хвоинок. Египетские грифы разбивают страусиные яйца, бросая в них камни. Некоторые цапли бросают в воду разные предметы (перья, личинки насекомых), чтобы приманить рыб. Семейство цапель в морском аквариуме Майами научилось приманивать рыб гранулированным кормом, который птицы воровали у сотрудников. Сычи собирают экскременты млекопитающих и раскладывают их вокруг своих гнезд, чтобы приманить жуков-навозников.

Но все-таки самые талантливые «технари» среди животных – приматы. Многие обезьяны разбивают камнями орехи, раковины и птичьи яйца; вытирают листьями грязные фрукты; используют жеванные листья в качестве губок, чтобы доставать воду из углублений (похожие технические решения наблюдались и у муравьев, столкнувшихся с необходимостью доставки в муравейник жидкой пищи); извлекают насекомых из щелей при помощи острых палочек; бросают камни и другие предметы в недругов.

Эксперименты показали, что высшие обезьяны в неволе быстро осваивают разнообразные, в том числе и весьма сложные, виды орудийной деятельности, которые никогда не наблюдаются у этих видов в природе. Вот тут-то и обнаруживается первая странность: почему при наличии таких способностей обезьяны в природе используют их довольно редко и явно не полностью? Так, из четырех ближайших к человеку видов (шимпанзе, бонобо, горилла, орангутан) систематическое использование орудий в природных условиях характерно лишь для шимпанзе. Остальные делают это очень редко, то есть «могут, но не хотят» (*Резникова, 2006*).

Вторая странность состоит в чрезвычайно большом размахе индивидуальных различий по «инструментальным способностям» у представителей одного и того же вида. Похоже, в природных популяциях «технические гении» мирно сожительствуют с «непроходимыми техническими тупицами», причем едва ли кто-то из них чувствует разницу. Иной капуцин справляется с задачами на сообразительность лучше многих шимпанзе. В ряде экспериментов и отдельные птицы, такие как новокаледонские галки, показывали лучшие результаты, чем человекообразные приматы. Знаменитые обезьяны «гении», такие как шимпанзе Ушо, горилла Коко или бонобо Канзи⁸, – это именно гении, а вовсе не типичные представители своих видов. Даже одно и то же животное может то показывать чудеса изобретательности, то проявлять необъяснимую тупость (к примеру, пытаться разбить орех вареной картофелиной).

Обычно считают, что орудийная деятельность животных – своеобразная вершина айсберга (ей предшествует оценка обстоятельств, поиск подходящих предметов, расчет последствий), и потому дает возможность интегральной оценки интеллекта. Возможно, это действительно так, но только приходится признать, что интеллект (в человеческом понимании), по-видимому, не является критичным для выживания большинства животных, что он – некий эпифеномен, побочный эффект более важных для их жизни характеристик мозговой деятельности. В противном случае в природных популяциях не было бы такого колоссального размаха изменчивости по этому признаку. Хотя, с другой стороны, разве у людей иначе?

Характерная особенность орудийной деятельности животных – быстрая фиксация и ритуализация найденных однажды решений и полнейшее нежелание переучиваться при изменении обстоятельств. По словам Н. Н. Ладыгиной-Котс (одной из первых исследовательниц обезьяньего интеллекта), «шимпанзе – раб прошлых навыков, трудно и медленно перестраиваемых на новые пути решения».

Шимпанзе Рафаэлю исследователи давали дырявую кружку и шарик, которым можно было заткнуть дырку. Рафаэль не догадывался это сделать, пока однажды случайно не плюнул шариком в кружку. Шарик заткнул отверстие, вода перестала вытекать, и шимпанзе это запомнил. С тех пор он постоянно пользовался шариком, чтобы заткнуть дырку в кружке, но всегда делал это тем же способом, что и в первый раз, – брал шарик в рот и плевал им в кружку. Через некоторое время ему дали кружку без дырки, и Рафаэль, совсем уж по-глупому, плевал шариком и в нее тоже. Наконец, когда ему предложили на выбор две кружки – привычную дырявую и целую, бедное животное не колеблясь выбрало дырявую. Впрочем, как знать, может, он просто любил свою дырявую кружку, а шариком плевался, потому что думал, что это нравится экспериментаторам?

Дикие шимпанзе в одном из африканских национальных парков научились сбивать плоды с дерева, на которое не могли забраться, с соседнего дерева при помощи сорванных с него веток. Когда все подходящие ветки были оборваны, животные впали в полную растерянность, и никто из них так и не догадался принести ветку с какого-нибудь другого дерева или куста, хотя для других целей (например, для выковыривания насекомых) шимпанзе часто пользуются палками, принесенными издалека.

Конечно, про людей тоже можно рассказать немало подобных историй. И потом, разве кто-то сомневается, что интеллект у людей в среднем все же мощнее, чем у нечеловеческих обезьян? Даром, что ли, наш мозг втрое больше по объему?

Ж. И. Резникова полагает, что подобное «глупое» поведение может быть обратной стороной способности к быстрому обучению, которое обеспечивается формированием устой-

⁸ Эти обезьяны лучше других освоили так называемые языки-посредники и в итоге научились разговаривать примерно на уровне ребенка 2–3 лет. Подробнее см. в книге З. А. Зориной и А. А. Смирновой «О чем рассказали говорящие обезьяны» (2006).

чивых ассоциативных связей. Возможно, если бы животные не учились так быстро, выученные стереотипы были бы не столь жесткими. А сумей они и вовсе избавиться от плена стереотипов, их поведение стало бы гораздо интеллектуальнее.

Об этом говорит ряд экспериментов. Многим животным (обезьянам и птицам) предлагалась задача «Трубка с ловушкой»: нужно вытолкнуть приманку из трубки палочкой или проволокой, однако в трубке есть дырка, через которую приманка может выпасть в «ловушку», откуда ее невозможно достать. Животное должно сообразить, что надо обойти экспериментальную установку и толкать с другой стороны. Задача оказалась трудной для всех, но некоторые обезьяны и птицы все-таки справились с ней, научились уверенно ее решать.

После этого экспериментаторы переворачивали трубку дыркой вверх. «Ловушка» становилась нефункциональной, и необходимость заходить сзади отпадала. Ни одно из животных не смогло этого понять. Даже «гении», показавшие блестящие результаты в других опытах, продолжали упорно обходить установку и толкать приманку «от ловушки», то есть настаивали на однажды выученном решении, хоть оно и потеряло смысл. В одном из экспериментов, однако, удалось разрушить сложившийся стереотип, заменив стеклянную трубку непрозрачной. Подопытный – дятловый вьюрок, – увидев, что трубка-то теперь другая, снова «включил мозги» и стал действовать адекватно ситуации.

Может быть, в этом и состоит то трудноуловимое, но все-таки реальное различие, грань между человеческим и нечеловеческим мышлением, которое нас делает людьми, а другим животным не позволяет подняться до нашего уровня? Может быть, все дело в том, что мы в меньшей степени рабы стереотипов и догм и чуть чаще «включаем мозги»?

Разница в степени, а не в качестве⁹

Впрочем, многие этологи полагают, что выводы о стереотипности мышления животных отчасти могут быть связаны с не совсем корректно поставленными экспериментами. Шимпанзе, живущий в неволе, действительно легко становится «рабом прошлых навыков», точнее – рабом повторяемости эксперимента, особенно если с ним работают специалисты по условным рефлексам. Возможно, животные просто принимают «правила игры», навязанные экспериментаторами.

Вышеупомянутый шимпанзе Рафаэль научился заливать огонь, который мешал ему взять апельсин, наливая воду в кружку из бака. Когда однажды в баке не оказалось воды, он был очень недоволен, но он схватил с окна бутылку для полива цветов и залил огонь из бутылки. В другой раз он помочился в кружку и залил огонь опять же из кружки. Он действительно отчасти стал рабом привычки. Когда опыты перевели на озеро, на причале стоял аппарат с огнем, а бак находился на плоту. Экспериментаторы думали: если шимпанзе понимает, что такое вода, то он наклонится и зачерпнет из озера. Вместо этого Рафаэль нашел доску, перебрался на плот и принес воду в кружке из бака. Очевидно, он не понимал, что такое вода, он просто умел заливать огонь из кружки. Но обезьяны не любят воду, и это может препятствовать изобретательству.

⁹ Факты, изложенные в этом разделе, автор почерпнул из беседы с известным этологом, специалистом по мышлению животных З. А. Зориной (кафедра высшей нервной деятельности биофака МГУ). Многие из них подробно разбираются в книге «Элементарное мышление животных» (Зорина, Полетаева, 2002).

При этом Рафаэль все-таки изобрел новое решение задачи: сделал мостик из доски и сходил за водой к баку. Когда этот опыт повторяли для съемок фильма «Думают ли животные», долгой дрессировки с кружкой там не было. Одна из обезьян взяла с пола тряпку и затушила ею огонь без всякой воды. И эта, и другие обезьяны все-таки черпали из озера. Животные могут находить разные способы решений той или иной задачи. Но если уже есть привычный, отработанный способ, зачем лишний раз напрягать мозги?

В решении животными разнообразных сложных задач больше удивляет не легкость формирования стереотипов, а тот факт, что животные все-таки с ними справляются. В основе таких решений лежит весьма сложная мысленная операция – составление плана действий, позволяющего добиться результатов в ситуации, для которой нет готового решения.

Особенно впечатляют достижения обезьян, обученных языкам-посредникам – упрощенным аналогам человеческого языка. Эти обезьяны понимают речь на слух, адекватно на нее реагируют и сами строят из значков осмысленные фразы. В одной серии опытов сравнивали понимание простых фраз у бонобо Канзи, которому тогда было восемь лет, и человеческого ребенка – девочки двух с половиной лет. Девочка выполняла задания в целом хуже, чем Канзи. Ему говорили: «Канзи, залезь ко мне в карман, достань зажигалку, зажги огонь». Он лез в карман, доставал зажигалку и разжигал костер. «Налей молоко в кока-колу» – и он наливал. Потом ему через неделю говорили: «Налей кока-колу в молоко» – и он наливал кока-колу в молоко, а не наоборот. «Возьми ключи, положи в большой холодильник» – и он кладет ключи в большой холодильник. «Отшлепай гориллу открывалкой для банок» – и он берет на кухне консервный нож, находит игрушечную гориллу и шлепает ее открывалкой для банок. При этом ребенок выполнял параллельно такие же задания. Иногда девочка просто не хотела выполнять просьбы экспериментаторов. Значит ли это, что ребенок глупее? Вряд ли. Девочка в то время уже учила стишки. Потом ребенок начал быстро развиваться, а шимпанзе так и остался на всю жизнь на этом уровне.

Разница между мышлением человека и других животных все-таки в степени, а не в качестве. Но разница в степени может быть очень большой. Даже в самых сложных своих достижениях шимпанзе все-таки не превышает уровня 2–3-летнего ребенка: это их потолок. С другой стороны, этологи в один голос утверждают, что единой шкалы умственных способностей, общей для всех животных, не существует. Невозможно ответить, кто «вообще» умнее: дельфины, обезьяны или попугаи. Разные виды животных справляются с одними типами задач лучше, с другими – хуже.

И человек в этом плане не исключение. Выше мы уже упоминали, что в решении некоторых интеллектуальных задач другие животные вполне могут нас «обставить»: например, сойки, белки и другие животные, запасующие пищу в тайниках, лучше нас умеют запоминать точки на местности. А если нам такое умение не кажется хорошим мериллом интеллекта, то следует задуматься: не потому ли мы его недооцениваем, что сами им плохо владеем?

Бескорыстная помощь

Многие животные (например, общественные насекомые) бескорыстно помогают близким родственникам. Иногда заботятся и о неродственных особях, но такая помощь обычно подкрепляется непосредственной выгодой для помогающего. В обоих случаях альтруистическое поведение способствует выживанию и распространению генов самого альтруиста. Поэтому гены, способствующие такому поведению, поддерживаются отбором (подробнее об этом мы поговорим в главе «Эволюция альтруизма»).

Бескорыстная помощь неродственным особям встречается крайне редко. Традиционно считалось, что это свойство присуще только человеку, а у животных полностью отсутствует. Однако сотрудники Института эволюционной антропологии им. Макса Планка в Лейпциге экспериментально показали, что не только маленькие дети, еще не умеющие говорить, но и молодые шимпанзе охотно помогают человеку, попавшему в трудную ситуацию, причем делают это совершенно бескорыстно (*Warneken, Tomasello, 2006*).

В опытах участвовали 24 ребенка в возрасте 18 месяцев и три молодых шимпанзе (трех- и четырехлетние). Дети и обезьяны наблюдали, как взрослый человек тщетно пытается справиться с какой-то задачей, и могли ему помочь, если у них возникало такое желание (но специально их к этому никто не подталкивал). Никакой награды за помощь они не получали.

В экспериментах использовались четыре вида задач.

1. Не достать. Человек случайно что-то роняет (например, карандаш), пытается поднять и не может – не дотягивается (эксперимент), – или нарочно бросает и равнодушно смотрит (контроль).

2. Физическое препятствие. Человек хочет положить в шкаф пачку журналов, но «не догадывается» открыть дверцы и врезается в них (эксперимент) – или пытается положить журналы на верх шкафа, врезаясь при этом в дверцы (контроль).

3. Неправильный результат. Человек кладет книгу на верх стопки, но она падает (эксперимент) – или кладет рядом со стопкой (контроль).

4. Неправильный способ. Человек роняет ложку в маленькое отверстие и пытается через него же достать ее, «не замечая» большого отверстия в боковой стенке ящика (эксперимент), – или нарочно бросает ложку в отверстие и не пытается ее достать (контроль).

Полуторагодовалые дети охотно помогали незнакомому человеку справиться с возникшей трудностью во всех четырех экспериментальных ситуациях (и не проявляли активности в контрольных экспериментах, где общая ситуация была похожей, но помощь не требовалась). Шимпанзе вели себя точно так же, но лишь в одной из четырех ситуаций, а именно в первой, где и цель экспериментатора, которой он не мог достичь, и способ ее достижения были наиболее очевидны. По-видимому, в остальных трех ситуациях шимпанзе в отличие от детей просто не могли понять, в чем проблема, – не могли «просчитать» цели экспериментатора, смысл его действий и результат, которого он хочет добиться.

В прежних экспериментах такого рода не удавалось зарегистрировать бескорыстное альтруистическое поведение у шимпанзе, потому что в этих экспериментах, чтобы продемонстрировать альтруизм, обезьяна должна была поделиться с экспериментатором (или другим шимпанзе) пищей. В природе шимпанзе активно конкурируют друг с другом за пищу и делиться не любят. Однако, как выяснилось, они готовы прийти на помощь постороннему, если речь идет об «инструментальных» задачах, не связанных с едой. Кстати, перед тем как

отдать экспериментатору оброненный им предмет, шимпанзе значительно дольше, чем дети, исследовали его и отдавали, только убедившись в его полной несъедобности.

Таким образом, бескорыстная взаимопомощь не является чисто человеческим свойством. Зачатки такого поведения, скорее всего, имелись уже у общих предков человека и шимпанзе, живших 6–7 миллионов лет назад.

Шимпанзе не бросают сирот¹⁰

Группа исследователей из Института эволюционной антропологии Макса Планка (Лейпциг, Германия) под руководством Кристофа Буша в течение почти трех десятилетий наблюдает за несколькими группами лесных шимпанзе в их естественной обстановке в национальном парке Берега Слоновой Кости. За это время ученые обнаружили, что в этих группах практикуются оригинальные технологии добывания орехов и обучение молодежи этим технологиям, а также что шимпанзе умеют планировать свои отношения с членами коллектива. Кроме того, удалось подтвердить наличие у шимпанзе такого чистого проявления альтруизма, как усыновление (*Boesch et al., 2010*).

Взять на воспитание осиротевшего малыша – дорогостоящее предприятие. Даже в человеческих обществах не так уж много сердобольных граждан, берущих на себя такую ответственность и такие затраты. Родителям-шимпанзе приходится не только кормить приемыша, но и таскать его на себе. Или, рискуя жизнью, ждать уставшего малыша, пока вся группа уже ушла вперед. Нужно защищать его от опасностей, делить с ним свое спальное место и ограждать от нападков сородичей.

Обычно все эти затраты и риски берет на себя мать. Ее родительское участие продолжается три – пять лет, пока детеныш не станет достаточно взрослым. Самцы редко принимают на себя даже малую долю этих трудностей. Поэтому, когда у маленького шимпанзенка умирает мать, он чаще всего тоже не выживает или очень сильно отстает в развитии – слишком трудна и опасна жизнь для неокрепших членов группы, лишившихся защитника. Шимпанзенки-сироты могут нормально вырасти только в случае усыновления. В неволе случаи усыновления неизвестны.

Но в природе, как показали наблюдения, такое случается.

За 27 лет ученые зарегистрировали 36 малышей-сирот, из которых были усыновлены 18. Примерно половина усыновленных детенышей (10 из 18) выжила. Среди приемышей было примерно одинаковое число девочек и мальчиков. Удивительно, что приемными родителями становились не только самки, но и самцы (тех и других было примерно поровну). Причем, как показали генетические тесты и наблюдения, среди самцов-усыновителей был только один настоящий отец осиротевшего детеныша, остальные были подростками братьями, друзьями погибших матерей или случайными членами группы.

Так, например, пятимесячного Момо взял друг умершей матери, то же произошло и с двумя другими осиротевшими шимпанзятами. Четырех малышей опекали совсем не связанные с матерью взрослые обезьяны.

¹⁰ Раздел написан Еленой Наймарк.

Приемные родители показывали чудеса заботы. Ученые наблюдали, как приемный отец расколол за два часа около 200 орехов, из которых 80 % отдал своему приемному сыну. Другой самец много месяцев таскал на спине приемную дочку, не бросая ее в опасных стычках с соседней враждебной группой. Немало трудностей пришлось пережить и Улиссу, среднеранговому самцу, дважды бравшему себе воспитанников. Самцы-конкуренты постоянно проявляли агрессию к его воспитанникам, чтобы таким образом сводить с ним счеты. Ему приходилось вступать в драки, защищая приемных детенышей. Ему удавалось выдерживать конфликты в первый раз полтора года, во второй раз три месяца; потом он все же бросал сирот. Поистине, за этими обезьяньими историями просматриваются настоящие трагедии с человеческими слезами!

Из-за того что многие приемные родители не были генетически связаны с сиротами, это поведение трудно объяснить действием родственного отбора. Трудно себе представить и какую-то пользу от рискованной и дорогостоящей заботы о брошенных детенышах, поскольку самцы брали себе сирот обоего пола с равной вероятностью. Вряд ли они целенаправленно растили для себя будущих защитников или покладистых самок для спаривания – усыновление было выгодно лишь самим детенышам-сиротам и не давало никаких выгод взрослым альтруистам. По-видимому, воспитание сирот, забота о них приносят пользу всей группе, увеличивая ее потенциальную численность.

Проявление столь очевидного альтруизма ученые связывают с условиями жизни конкретной популяции. Все группы шимпанзе, в которых зафиксированы случаи усыновления, обитают в крайне опасном окружении. В отличие от других районов здесь много леопардов – наиболее опасных для шимпанзе хищников. Только кооперативное поведение – слаженные действия во благо группы – позволяет шимпанзе защищаться от этих свирепых врагов. В таких условиях и происходит становление альтруистического поведения.

В других популяциях, где пресс хищников невелик, а также в неволе подвиги становятся необязательными.

В человеческих обществах, между прочим, альтруистическое поведение тоже характерно для групп, живущих в окружении врагов и постоянно участвующих во внешних конфликтах. Таким образом, ясно видятся аналогии в становлении альтруистического поведения у шимпанзе и людей (подробнее см. в главе «Эволюция альтруизма»).

Планы на будущее

11

Планирование отдаленного будущего традиционно считалось чисто человеческой чертой. Турист перед походом собирает рюкзак, тщательно продумывая, что ему может пригодиться – топор, веревки, рыболовные крючки, ложка с кружкой и много другого, – хотя в момент сборов нет необходимости рубить ветки или ловить рыбу. Чтобы собрать рюкзак, нужно хорошо представлять себе, как будут разворачиваться дальнейшие события. Точно спланированные действия считаются признаком мудрости, плохо спланированные – легкомыслия (мол, будь что будет). Однако оказалось, что и эта эксклюзивная черта присутствует у других животных, нужно только правильно поставить эксперимент.

Германские этологи из уже неоднократно упоминавшегося Института эволюционной антропологии в Лейпциге поставили четыре серии опытов с орангутанами и бонобо. Предки орангутанов отделились от эволюционной линии наших предков около 15 млн лет назад, бонобо – 6–7 млн лет назад. По результатам экспериментов исследователи надеялись примерно определить, на каком этапе сформировалась способность к планированию.

Обезьянам предлагали решать задачу на выбор правильного орудия. В специальном аппарате крепилась трубка с двумя дырочками в стенках, в эти дырочки поперек трубки вставлялась сухая макаронина, к двум концам которой привязывались виноградные кисти. Обезьяна должна была выбрать тонкую палочку, просунуть ее в трубку и сломать макаронину. Тогда виноград падал из аппарата в руки обезьяне.

Когда обезьяны научались правильно выполнять это задание, начались тесты по планированию. Обезьяне показывали закрытый аппарат, из которого ничего нельзя было достать, и предлагали на выбор восемь инструментов (два подходящих и шесть непригодных). Через пять минут ее выпроваживали из комнаты и приводили назад через час. Теперь уже аппарат был открыт, и если обезьяна приносила с собой правильно выбранный инструмент, то могла достать себе виноград.

Итак, сначала правильно выбрать инструмент, затем взять его с собой, затем принести обратно в комнату – не так уж это просто. Тем не менее в 70 % случаев тест был пройден успешно! В двух случаях обезьяны унесли с собой неправильные орудия. Но, войдя в комнату с открытым аппаратом, быстренько сообразили, в чем дело, обработали неподходящие орудия, отломав лишние части, и все-таки добрались до винограда.

В другом эксперименте обезьян уводили из комнаты с закрытым аппаратом на целых 14 часов. Действия обезьян оказались успешными даже больше чем в 70 % случаев.

В третьей серии опытов обезьянам предлагали выбрать правильное орудие, когда сотрудники только устанавливали аппарат, то есть самого аппарата с виноградом еще не было. Успешными оказались 40 % попыток.

Если же, как это было проделано в четвертой серии экспериментов, обезьяны не видят, что устанавливают аппарат, то они не справляются с заданием, хотя в случае правильно выбранного и принесенного назад орудия получают награду. Удручающе низкий успех в последнем эксперименте показывает, что планирование нельзя объяснить формированием условного рефлекса, пусть даже и сложного (*Mulcahy, Call, 2006*).

¹¹ Раздел написан Еленой Наймарк.

Критическая самооценка и «метапознание»

Всем животным, включая людей, часто приходится принимать решения на основе неполных или неоднозначных исходных данных. Главное при этом – оптимальным образом обработать имеющуюся информацию, чтобы максимизировать шансы на успех. С этой задачей животные во многих ситуациях худобедно справляются. Но есть и другая сторона проблемы: часто оказывается полезным умение адекватно оценить вероятность того, что принятое решение было правильным. Особенно это актуально в тех случаях, когда последствия совершенного поступка (например, награда или наказание) реализуются не сразу, а спустя какое-то время. От степени уверенности в собственной правоте зависит, будем ли мы спокойно ждать награды или спешно искать способ избежать наказания.

Многие эксперты полагали, что для подобных оценок необходимо самосознание, которым обладает лишь человек, а в зачаточной форме, возможно, некоторые другие приматы. Действительно, казалось бы, как может существо, не обладающее самосознанием, неспособное анализировать постфактум свои поступки и их мотивы, быть уверенным (или неуверенным) в том, что совершенный ранее поступок был правильным?



Умение критически оценивать себя и свои поступки, по-видимому, распространено среди животных намного шире, чем было принято считать.

К счастью, современных нейробиологов и психологов-экспериментаторов абстрактными рассуждениями не убедишь – им подавай конкретные факты. Чтобы доподлинно узнать, способны ли животные, не относящиеся к приматам, адекватно оценивать правильность собственных решений, команда ученых из США и Португалии поставила серию оригинальных экспериментов на крысах. Результаты этой работы, опубликованные в журнале *Nature*, показали, что крысам в полной мере свойственна упомянутая способность (*Keress et al., 2008*).

Крыс научили выбирать одну из двух поилок в зависимости от того, запах какого из двух пахучих веществ – А или Б – преобладает в воздухе. В роли вещества А выступала капроновая кислота, в роли вещества Б – 1-гексанол. Если крысе давали понюхать смесь с соотношением А/Б > 50/50, крыса должна была выбрать левую поилку, при А/Б < 50/50 – правую. За правильный выбор крысу награждали (давали каплю воды). Награда, однако, появлялась не сразу – крысу заставляли ждать у выбранной поилки, мучаясь неопределенностью, от 0,3 до 2 секунд.

Меняя соотношение веществ А и Б в пахучей смеси, исследователи могли регулировать сложность задачи. Понятно, что чем ближе это соотношение к 50:50, тем труднее крысе сделать правильный выбор. Как и следовало ожидать, крысы ошибались тем чаще, чем сложнее была задача (см. нижний график на рисунке).

Подопытным крысам вживили электроды в орбитофронтальную кору (ОФК) – участок мозга, отвечающий за принятие решений в спорных ситуациях. Регистрировалась активность индивидуальных нейронов в то время, пока крыса находилась у выбранной поилки в ожидании награды и еще не знала наверняка, права она или ошиблась.

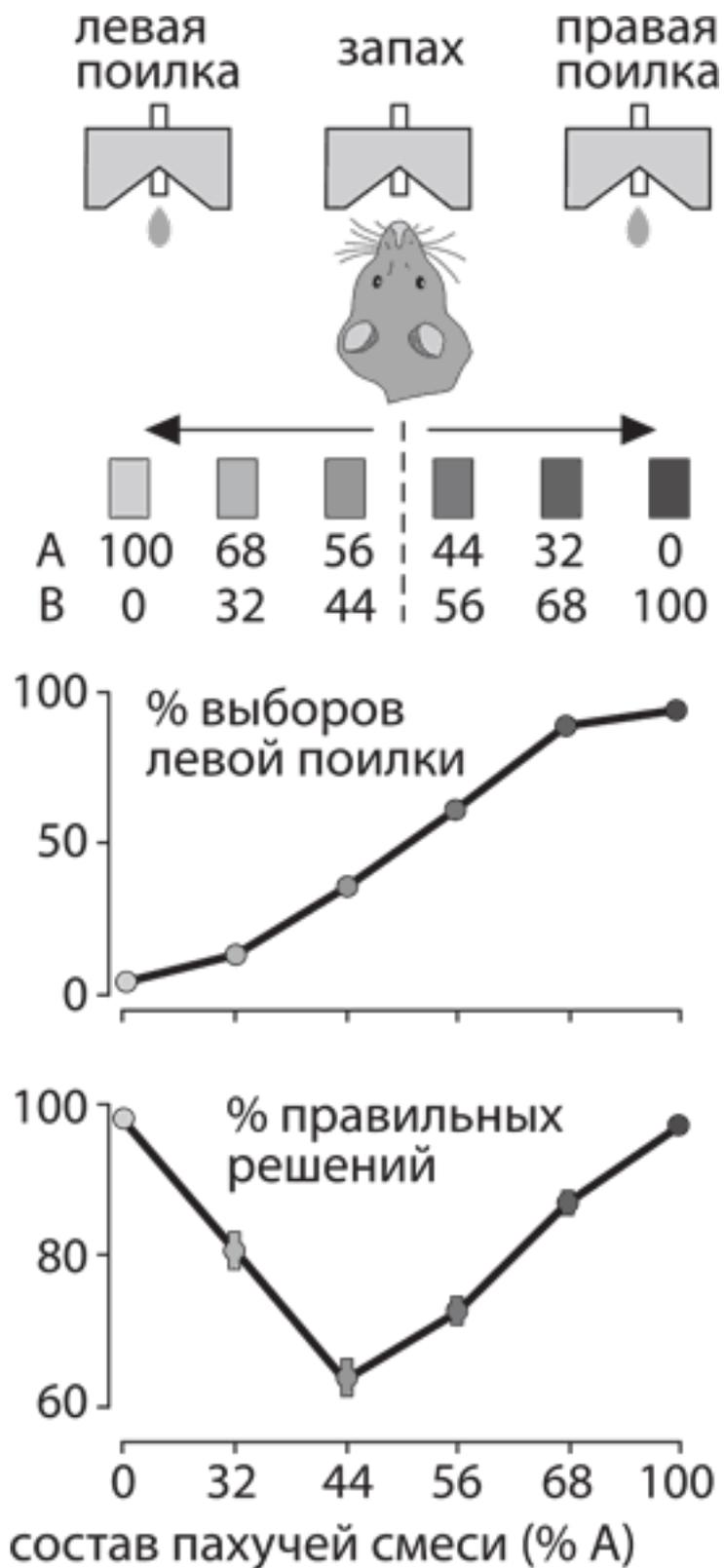


Схема эксперимента. На верхнем графике показано, с какой частотой одна из крыс выбирала левую поилку при шести разных составах пахучей смеси (100:0, 68:32, 56:44, 44:56, 32:68, 0:100). Нижний график показывает, с какой частотой три произвольно выбранные крысы принимали правильные решения. По рисунку из Kerecs et al., 2008.

Ученые обнаружили, что активность многих нейронов ОФК в этот волнительный для крысы момент зависит от степени сложности только что решенной задачи. Часть нейронов,

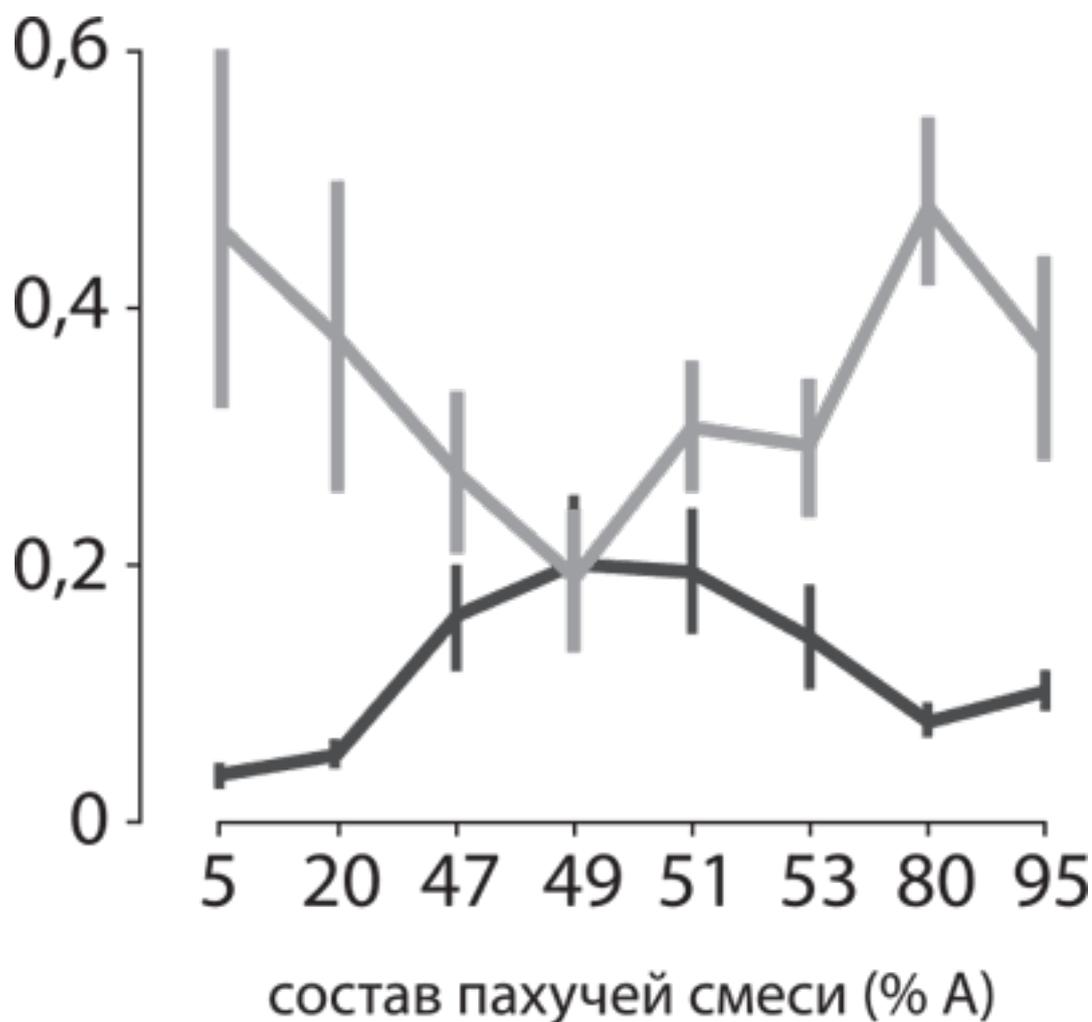
активность которых удалось записать (120 из 563), генерировали более частые импульсы в том случае, если выбор был сложным. Несколько меньшее число нейронов (66 из 563), наоборот, работало активнее, если решенная задача была легкой.

Еще более интересные результаты были получены, когда ученые сопоставили активность отдельных нейронов не со сложностью, а с *правильностью* сделанного выбора. Напомним, что активность нейронов регистрировалась в тот период, когда награда еще не могла появиться, то есть крыса еще не знала наверняка, правильно ли она поступила. Как ни странно, оказалось, что многие нейроны «знают» это заранее. Значительная часть нейронов работала активнее в случае ошибочного решения; несколько меньшее их число генерировало более частые импульсы в случае правильного выбора. При помощи математического моделирования и сложных статистических тестов ученым удалось показать, что активность этих нейронов не зависит ни от того, как часто крыса ошибалась в предыдущих тестах, ни от иных «посторонних» факторов. Эта активность в точности отражает ту оценку правильности сделанного выбора, которую крыса в принципе может «вычислить» на основе своих знаний о характере запаха в данном тесте, об условиях задачи и о собственном только что принятом решении.

Таким образом, экспериментатор, наблюдающий за активностью нейронов ОФК в крысином мозгу и ничего не знающий ни о составе пахучей смеси, ни о том, какую поилку крыса выбрала, может довольно точно определить, правильное ли решение было принято крысой. Иными словами, в мозге крысы в период «ожидания» уже содержится вполне достоверная информация о том, насколько высока вероятность получения награды. Но способна ли крыса использовать эту информацию, извлечь из нее какую-то пользу для себя?

Чтобы ответить на этот вопрос, ученые немного изменили дизайн эксперимента. Во-первых, время ожидания удлиннили: теперь крыса после принятия решения должна была ждать награды от 2 до 8 секунд. В случае правильного решения каждый раз выбирался случайный интервал времени в пределах этого диапазона. В случае неправильного решения ровно через 8 секунд раздавался звуковой сигнал, означающий, что дальнейшее ожидание бессмысленно. Во-вторых, крысе предоставили возможность в любой момент прекратить ожидание и начать тест заново, то есть вернуться к источнику запаха, понюхать, а затем снова выбрать одну из двух поилок.

В этой ситуации умение оценивать вероятность ошибки перестало быть для крысы бесполезным, как в первой серии экспериментов. Если крыса уверена в своей правоте, ей выгодно ждать до упора – награда в конце концов обязательно появится. Если же крыса полагает, что скорее всего ошиблась, ей лучше не тратить зря время и поскорее начать все заново.



Крысы оценивают вероятность того, что сделали правильный выбор, и используют результат оценки к собственной выгоде. Показаны данные по одной из крыс. По вертикальной оси – процент случаев, когда крыса не стала дожидаться награды и начала тест заново. Светлая линия соответствует тем случаям, когда крыса ошиблась (и награду ждать было бесполезно), темная линия отражает случаи правильного выбора. По рисунку из Kerpecs et al., 2008.

Результаты этой серии экспериментов (см. рисунок) показали, что крысы отлично умеют извлекать выгоду из результатов проведенной самооценки. Если задача была проста, а выбор был сделан неверно, крыса с большой вероятностью не будет ждать все 8 секунд, а начнет тест заново (крайние левый и правый участки светлой кривой на графике). Крысы, сделавшие неправильный выбор, ждут терпеливее, если задача была сложной («а вдруг я угадала?»). На рисунке это обстоятельство отражается вогнутой средней частью светлой кривой. Если задача была проста и выбор был сделан правильно, крыса вполне уверена в своей правоте и ждет до конца (крайние участки темной кривой). По мере того как задача усложняется (%A приближается к 50), степень самоуверенности крыс, сделавших правильный выбор, снижается (темная кривая в середине выше, чем по краям). Добавим, что в ОФК изученных крыс было обнаружено большое число нейронов, активность которых подчиняется той же закономерности: если на рисунке по вертикальной оси вместо частоты досрочных уходов от поилки отложить активность этих нейронов, то обе кривые – и светлая, и темная – будут иметь примерно такую же форму.

Таким образом, для того чтобы адекватно оценивать правильность собственных решений, вовсе не обязательно иметь огромный мозг и развитое самосознание, как у человека. С

этой задачей неплохо справляются и грызуны. Исследователи предполагают, что алгоритм подобной самооценки, возможно, является неотъемлемой составной частью общего механизма принятия решений, «встроенного» в мозг высших животных.

Аналогичные исследования проводят, конечно, не только на крысах, но и на людях (см. главу «Жертвы эволюции»), и на других приматах. Интересные результаты по четырем видам человекообразных опубликовал недавно Джозеп Колл, руководитель приматологического центра все того же Института эволюционной антропологии им. Макса Планка в Лейпциге (Call, 2010). В начале статьи автор рассказывает о том, как он собирается в заграничные командировки. Упаковав паспорт и билеты с вечера, утром в день отъезда он всегда проверяет, на месте ли документы. В чем смысл этого действия, если он прекрасно помнит, куда их положил, и ночью к его сумке никто не прикасался? Очевидно, пишет Колл, я понимаю, что людям свойственно ошибаться. Лучше лишний раз удостовериться, что память меня не подводит – особенно если цена ошибки высока (авиабилеты Колл перепроверяет чаще, чем железнодорожные, потому что их труднее восстановить в случае потери). Это одно из проявлений способности к *метапознанию* – обдумыванию и оценке собственных мыслей и знаний. Колл называет этот поведенческий стереотип эффектом паспорта.

Специалисты по когнитивной этологии¹² провели много экспериментов для выяснения вопроса о наличии метапознания у разных животных. Для этого были разработаны специальные методики. Например, животному предоставляется возможность отказаться от прохождения теста, причем за отказ животное получает небольшое вознаграждение, за удачное выполнение задания дается более желанная награда, а за неудачное – ничего. Затем задание постепенно усложняют (например, заставляя животное делать выбор между двумя все более похожими друг на друга фигурами, звуками или запахами, как в вышеописанном эксперименте с крысами) и смотрят, будет ли расти частота «отказов».

В ходе этих экспериментов выяснилось, что крысы, дельфины и обезьяны при недостатке информации ведут себя вполне по-человечески: отказываются от прохождения теста или пытаются получить дополнительные сведения. По-видимому, это значит, что животные здраво оценивают собственную информированность и компетентность и понимают, каковы их шансы на успешное выполнение задания.

Однако не все эксперты согласны с тем, что эти результаты доказывают наличие метапознания у нечеловеческих животных. Некоторые критики полагают, что подопытные могли научиться максимизировать свой выигрыш, ориентируясь не на уверенность в собственных знаниях, а на конкретную экспериментальную ситуацию. Имеется в виду, что их поведение может быть основано не на метакогнитивном рассуждении («я вряд ли справлюсь с этой задачей, поэтому лучше отказаться»), а на более простом механическом навыке («если показывают два одинаковых круга, жми кнопку “отказ”»).

Критике подверглись и те эксперименты, в которых было показано, что животные при недостатке информации активно пытаются получить недостающие сведения. Может быть, у животного, не понимающего, как добыть лакомство, просто включается «генерализованная поисковая программа» – оно ищет не ключ к решению задачи, а само угощение? Когнитивная этология постоянно сталкивается с такими проблемами, связанными с неоднозначностью интерпретаций. Для окончательного решения того или иного вопроса, даже совсем простого на первый взгляд, порой требуются десятки разнообразных экспериментов.

Колл сообщает о результатах трех новых серий опытов с человекообразными обезьянами. Целью работы был поиск дополнительных аргументов за или против наличия у них метапознания. В частности, Колл хотел понять, характерен ли для обезьян эффект паспорта. В экспериментах приняли участие восемь шимпанзе, четыре бонобо, семь горилл и семь

¹² Когнитивная этология изучает интеллект и познавательные процессы у животных.

орангутанов. Во всех тестах обезьяны должны были определить, в какой из двух непрозрачных трубок находится угощение.

В первой серии экспериментов сравнивались три ситуации. В первом случае экспериментатор помещал лакомство (специальное печенье для обезьян) в одну из трубок на глазах у животного. Во втором случае обезьяна видела, что печенье кладут в одну из трубок, но не знала в какую. Третья ситуация отличалась от второй тем, что экспериментатор, «зарядив» одну из трубок, потом брал по очереди обе трубки и тряс их, так что можно было по стуку понять, где печенье. После этого обезьяна должна была сделать выбор, прикоснувшись к одной из трубок. Перед тем как принять ответственное решение, она могла заглянуть в трубку, чтобы убедиться в правильности своего выбора. Трубки располагались двумя разными способами: в одном случае заглянуть в трубку было легко, в другом – трудно.

Как и следовало ожидать, обезьяны реже заглядывали в трубку, если видели своими глазами, куда было положено печенье. Звуковая информация (стук при потряхивании трубки) влияла на их поведение по-разному в зависимости от сообразительности данной обезьяны. Ранее (в 2004 году) все участники эксперимента проходили тест на способность использовать звуковую информацию при поиске пищи. Примерно половина обезьян справилась с заданием, половина – нет. В нынешнем эксперименте те обезьяны, которые успешно прошли тест в 2004 году, реже заглядывали в трубку в ситуации 3 (когда была звуковая информация), чем в ситуации 2 (когда никакой информации не было). Напротив, те обезьяны, которые в 2004 году не сумели найти угощение по звуку, вели себя одинаково в ситуациях 2 и 3 (заглядывали в трубку одинаково часто). Таким образом, вероятность заглядывания связана со степенью информированности: чем точнее обезьяна знает, где лакомство, тем ниже вероятность того, что она заглянет в трубку перед принятием решения.

Повышенная трудность заглядывания в трубку привела к снижению частоты заглядывания в ситуации 1 у всех обезьян, а в ситуации 3 – только у «умных», способных найти печенье по звуку. В ситуации 2 участники эксперимента почти всегда заглядывали в трубку, независимо от трудности этого действия.

По-видимому, заглядывание в ситуации 1, а для «умных» обезьян также и в ситуации 3 – это типичный эффект паспорта. Обезьяна на всякий случай проверяет то, что ей и так известно. При этом обезьяны хорошо понимают, когда можно пренебречь такой проверкой, а когда нельзя. Гипотеза о наличии у обезьян метапознания лучше объясняет эти результаты, чем альтернативные гипотезы.

Во второй серии экспериментов изучалось влияние забывчивости. На этот раз приманку всегда клали в одну из трубок на глазах у обезьяны, но принимать решение нужно было не сразу, а через 5, 20, 60 или 120 секунд. При этом отверстия трубок либо загоразивали, так что заглянуть в трубку перед выбором было нельзя (ситуация 1), либо оставляли отверстия открытыми, позволяя обезьяне удостовериться в правильности своего решения (ситуация 2). Первая ситуация использовалась для того, чтобы определить, с какой скоростью обезьяны забывают увиденное. Вторая – для того, чтобы понять, влияет ли забывание на вероятность заглядывания. Оказалось, что обезьяны довольно быстро забывают, куда было положено угощение: частота правильных угадываний в «закрытых» тестах быстро снижалась с увеличением временного интервала. Параллельно росла и частота заглядываний в «открытых» тестах.

Обезьяна, по-видимому, понимает, что она забыла, где приманка, и заглядывает в трубку, чтобы восстановить утраченную информацию. Об этом можно судить еще и по тому, в какую из двух трубок обезьяна заглянет первой – в «правильную» или в пустую. С увеличением отсрочки росла частота заглядываний в пустую трубку, что подтверждает гипотезу о

забывании. Однако в большинстве случаев – даже после двухминутной задержки – обезьяны все-таки заглядывали сразу в «правильную» трубку. Следовательно, по крайней мере в некоторых случаях, обезьяна на самом деле не забыла, где угощение, а просто хотела лишний раз удостовериться, что память ее не подводит. С течением времени ее уверенность в точности собственных воспоминаний снижается. То есть налицо типичный эффект паспорта.

В третьей серии экспериментов гипотеза об эффекте паспорта подверглась еще одному испытанию. Люди склонны чаще перепроверять и без того известные им вещи, если цена ошибки высока. Если обезьяны мыслят так же, частота заглядывания в трубку должна положительно коррелировать с желанностью награды. В этой серии экспериментов в качестве малоценного угощения использовали кусочки моркови или апельсина, а высшей наградой был виноград. Это соответствует вкусам обезьян (и было дополнительно подтверждено в рамках данного исследования специальными тестами на пищевые предпочтения). Оказалось, что обезьяны достоверно чаще заглядывают в трубку перед принятием решения, если речь идет о винограде. При этом процент правильных угадываний был одинаковым для обоих типов угощений.

Эксперимент также показал, что обезьяны одинаково хорошо помнят, куда было положено угощение, независимо от его ценности. Однако они предпочитают лишний раз удостовериться в том, что не ошиблись, если ставки высоки.

В целом полученные результаты явно свидетельствуют в пользу наличия у обезьян метапознания и в частности эффекта паспорта.

Дикие девочки-шимпанзе играют в куклы

Во всех человеческих культурах девочки любят играть в куклы, а мальчики предпочитают машинки (или другие игрушки на колесиках) и сабли с пистолетами. Это, между прочим, не досужие рассуждения, а факт, подтвержденный статистически в ходе специальных исследований. Такие же половые различия в выборе игрушек характерны и для юных нечеловеческих обезьян, воспитывающихся в неволе. Обезьяны-девочки предпочитают кукол и плюшевых зверей, мальчики выбирают «мужские» игрушки. Считается, что эти различия обусловлены отчасти социальным обучением (взрослые и сверстники вольно или невольно «учат» детей, в какие игрушки им положено играть), отчасти – врожденными склонностями. За детенышами диких приматов подобного поведения ранее не замечали. Однако недавно американские антропологи, в течение 14 лет наблюдавшие за группой диких шимпанзе в национальном парке Кибале в Уганде, сообщили, что в природе девочки-шимпанзе тоже играют в дочки-матери (*Kohlenberg, Wrangham, 2010*).

В роли кукол выступают разнообразные деревяшки. Обезьяны носят их повсюду, спят с ними в своих гнездах, играют с ними примерно так же, как матери-шимпанзе со своими младенцами. Девочки занимаются этим намного чаще, но и мальчикам не чуждо такое поведение. Это хорошо согласуется с тем обстоятельством, что у шимпанзе забота о детях возложена в основном на самок, однако самцы при необходимости тоже иногда нянчатся с подрастающим поколением (см. выше). Однажды исследователи наблюдали даже, как юный самец построил для своей палочки-куклы особое

гнездышко. В пользу того, что это именно игра в куклы, свидетельствуют следующие факты.

Во-первых, данное поведение достоверно чаще наблюдается у девочек, чем у мальчиков. Это нельзя объяснить просто тем, что самки вообще чаще возятся с предметами. Другие виды деятельности, связанные с использованием предметов, наоборот, характерны больше для самцов. Например, самцы чаще используют палки в качестве оружия в агрессивных стычках, а листья – для вытирания разных частей тела. У самцов этого шимпанзинового племени, между прочим, существует обычай вытирать листьями свои гениталии после копуляции. Самки не используют листья в гигиенических целях.

Во-вторых, деревянные «куклы» никогда не используются для иных целей: ни как оружие, ни как палки-ковырялки. Самки чаще самцов используют палочки в качестве зондов или щупов, чтобы проверять дупла, где может быть вода или, скажем, пчелиное гнездо с медом. Однако такие палочки-зонды совсем не похожи на деревяшки, используемые в качестве кукол. Куклы гораздо толще и тяжелее.

В-третьих, в отличие от всех остальных способов использования палок, игры в дочки-матери полностью прекращаются с рождением первого детеныша. Изредка за игрой в куклу удавалось застукать и взрослую самку, но это всегда оказывалась самка, не имеющая пока собственных детей.

Авторы отмечают, что в других группах диких шимпанзе, за которыми ведутся наблюдения, отмечались только отдельные случаи похожего поведения. Например, одна юная самка в Боссу (Гвинея) нянчила деревяшку совсем как ребенка, пока ее мать ухаживала за умирающей младшей сестрой. Но регулярных игр в дочки-матери в других коллективах шимпанзе не замечено. Следовательно, это не чисто инстинктивное поведение, а основанный на врожденных психологических склонностях культурный феномен, местная традиция, передающаяся путем подражания. Дети не могут научиться игре в куклы у своих матерей, потому что матери никогда этим не занимаются. Значит, они учатся друг у друга. До сих пор подобные «детские традиции» были известны лишь у людей.

Вот и еще одна «чисто человеческая» черта оказалась общей для людей и шимпанзе. Может быть, в куклы играли и наши общие предки, жившие 6–7 млн лет назад.

Все дело в объеме рабочей памяти?

Больше памяти – больше ума. Мозг человека отличается от мозга наших ближайших невымерших родственников – шимпанзе и бонобо – в основном размером (он втрое массивнее). Структурные различия, конечно, тоже есть, но они сравнительно невелики и приурочены в основном к отделам, связанным с решением социальных задач. Этот факт наряду со многими другими указывает на то, что Дарвин, по-видимому, все-таки был прав, когда говорил, что различия между интеллектом человека и «высших животных» имеют не столько качественный, сколько количественный характер: обезьяны обладают теми же умственными способностями, что и мы, только эти способности у них развиты слабее. С другой стороны, некоторые способности в ходе эволюции человека могли развиваться быстрее других – например, социальный интеллект (см. главу «Общественный мозг»). С этим согласуется и тот факт, что некоторые отделы мозга (например, префронтальная кора) в ходе антропогенеза увеличились значительно сильнее, чем другие.

Увеличение мозга должно было практически неизбежно вести к росту объема памяти. Ведь память, как известно, хранится не в каком-то специально выделенном для этой цели участке мозга, а распределяется по всем отделам, причем для запоминания используются те же нейроны, которые возбуждались при непосредственном переживании события (подробнее об этом мы поговорим в главе «Душевная механика»). Увеличение объема памяти в свою очередь теоретически может оказаться достаточным объяснением всех прочих усовершенствований нашего мыслительного аппарата. В данном случае допустима аналогия с компьютером: известно, что чем больше у компьютера памяти, тем более сложные программы он может выполнять, причем эта зависимость работает в довольно широких пределах даже при одном и том же процессоре.

Антрополог Дуайт Рид из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, как и многие другие специалисты, полагает, что интеллектуальные способности особенно сильно зависят от объема так называемой *кратковременной рабочей памяти* (КРП; мы уже немного говорили о ней в главах «От эректусов к сапиенсам» и «Другое человечество» в кн. 1). Говоря упрощенно, это та часть памяти, в которой хранится и обрабатывается информация, непосредственно необходимая субъекту в данный момент. Это то, на чем сосредоточено наше внимание. В вашей КРП сейчас, скорее всего, находится несколько последних слов этого текста – примерно столько, сколько вы сможете повторить с закрытыми глазами, не задумываясь и без запинки.

По современным представлениям, рабочая память имеет довольно сложную структуру. Центральное место в ней занимает *центральный исполнительный компонент*, локализованный в одном из участков префронтальной коры (а именно в полях Бродмана 9 и 46)¹³. Его главная задача – удерживать внимание на той информации, которая необходима субъекту для решения насущных задач. Сама эта информация может храниться где-то еще – например, в рассеянной по всей коре *долговременной рабочей памяти* (ДРП), о которой говорилось в главе «От эректусов к сапиенсам».

Ключевое значение имеет емкость КРП, измеряемая количеством идей, образов или концепций, с которыми исполнительный компонент рабочей памяти может работать одновременно. Специально для читателей с высоким уровнем компьютерной грамотности поясню, что компьютерным аналогом КРП является не оперативная память (которая больше похожа на ДРП, хотя сходство очень неполное), а *регистры процессора*.

¹³ Немецкий ученый К. Бродман в 1909 году выделил в коре больших полушарий человеческого мозга участки, различающиеся по своему строению на клеточном уровне. Разделение всей коры на 52 поля Бродмана используется по сей день.

Эту важнейшую характеристику рабочей памяти называют объемом кратковременной рабочей памяти (ОКРП) (по-английски – short-term working memory capacity, ST-WMC). Многочисленные эксперименты показали, что у человека ОКРП ≈ 7 (хотя некоторые исследователи склоняются к более осторожным оценкам и предпочитают говорить о величине 7 ± 2). Большинство других животных не может обдумывать комплексно, как часть единой логической операции, более одной, от силы двух идей (ОКРП ≤ 2).

Как мы знаем из первой части книги, некоторые психологи и антропологи полагают, что именно объем кратковременной рабочей памяти является ключом к пониманию «человеческой уникальности». Дуайт Рид – автор одной из версий этой вполне правдоподобной теории. Рид отстаивает следующие три положения (*Read, 2008*).

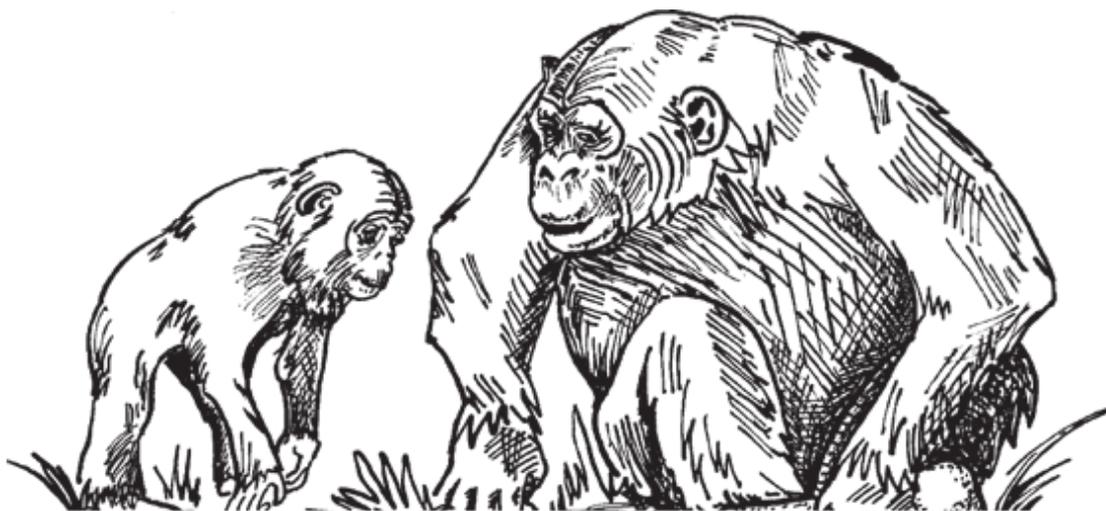
1. У наших ближайших родственников шимпанзе и бонобо ОКРП ≤ 3 . Одновременное оперирование тремя понятиями – предел возможностей для современных нечеловеческих обезьян, а также, скорее всего, для последнего общего предка шимпанзе и человека, жившего 6–7 млн лет назад (иначе пришлось бы предполагать умственную деградацию в линии шимпанзе, а для этого нет серьезных оснований).

2. Малый объем кратковременной памяти не позволяет нечеловеческим обезьянам мыслить рекурсивно¹⁴, и в этом состоит важнейшее качественное отличие их интеллекта от нашего. Рекурсивное мышление необходимо для решения самых разнообразных задач – от изготовления каменных орудий, более совершенных, чем ашельское рубило *Homo erectus*, до выяснения родственных отношений и формирования структуры рода («я – сын такого-то, сына такого-то» – образец рекурсивного рассуждения).

3. В ходе антропогенеза происходил постепенный рост ОКРП от 2–3 (у общего предка человека и шимпанзе) до 7 (у современного человека). Этот рост отражен в увеличении объема мозга (особенно сильно увеличилась префронтальная кора, где находится исполнительный компонент рабочей памяти), а также в усложнении каменных орудий.

Колоть орехи дано не каждому. Для подтверждения своей гипотезы Рид анализирует традиции колки орехов у шимпанзе. В некоторых популяциях диких шимпанзе из поколения в поколение тысячелетиями передается умение колоть орехи камнями. «Тысячелетиями» – это не фигура речи, а археологически подтвержденный факт. Шимпанзе из года в год колют орехи в одних и тех же местах, что приводит к формированию культурных слоев с ореховой скорлупой и характерными обломками камней. Это обстоятельство привело к появлению удивительной научной дисциплины – *археологии шимпанзе*. Между прочим, каменные обломки, образующиеся при колке орехов, порой напоминают примитивные олдувайские орудия. На этом основании некоторые археологи предполагают, что гоминиды, возможно, изначально пользовались камнями тоже для раскалывания орехов или, скажем, мозговых костей – ведь это технологически очень схожие задачи (*Mercader et al., 2002*).

¹⁴ Объект (такой как мысленная операция или последовательность действий) называется рекурсивным, если он содержит сам себя или обращается к самому себе. Примером рекурсии является следующий алгоритм вычисления факториала: «Факториал числа N есть число N , умноженное на факториал числа N_{-1} » (с необходимой оговоркой, что факториал нуля равен единице).



Искусство колки орехов в некоторых популяциях шимпанзе передается из поколения в поколение как культурная традиция – за счет обучения и подражания.

У шимпанзе колка орехов не является врожденным поведением – это настоящая культурная традиция. Молодые обезьяны учатся у матери или старших товарищей. Судя по всему, обезьянам требуется предельное напряжение ума, чтобы овладеть этой наукой. Рид подчеркивает, что далеко не все популяции шимпанзе владеют тайной раскалывания орехов, хотя орехи потенциально являются для них ценным пищевым ресурсом. Шимпанзе, живущие в неволе, обычно не могут сами догадаться, как вскрыть орех, даже если им предоставить в изобилии и орехи, и подходящие камни.

Детальные наблюдения за шимпанзе, умеющими колоть орехи, проводились в национальном парке Таи в Кот-д'Ивуаре и в лесах у деревни Боссу в Гвинее. Шимпанзе из Таи манипулируют двумя объектами: орехом и камнем, который используется в качестве молотка. Наковальной служат элементы рельефа, которыми не нужно манипулировать, – например, плоский выход скальных пород или корень дерева. В Таи все взрослые обезьяны умеют колоть орехи. Очевидно, управляться с двумя объектами может научиться любой шимпанзе.

Шимпанзе из Боссу пытаются совладать сразу с тремя объектами, потому что у них принято использовать в качестве наковальни небольшой камень, который нужно выбрать и правильно установить. Обычно наковальня получается шаткая, и ее нужно придерживать. Иногда используется и четвертый объект – камень-клин, которым шимпанзе подпирают наковальню, чтобы не шаталась. Но в этом случае сначала обезьяна возится с двумя объектами (наковальней и клином), а потом с тремя (наковальней, которую все равно нужно придерживать, орехом и молотом). С четырьмя предметами одновременно никто работать не пытается (клин не придерживают).

Обучение искусству раскалывания орехов протекает долго и мучительно. В возрасте полутора лет обезьяны начинают имитировать отдельные действия, входящие в комплекс (например, стучат по ореху рукой). Примерно в два с половиной года они уже выполняют последовательности из двух действий (например, кладут орех на камень и стучат рукой). Лишь в возрасте трех с половиной лет они оказываются в состоянии правильно выполнить всю цепочку операций: найти наковальню, положить орех и стукнуть камнем.

Если шимпанзе из Боссу не научился колоть орехи до пяти лет, то не научится уже никогда. Бедная обезьяна будет до конца своих дней с завистью смотреть на соплеменников, ловко колющих орехи, но так и не сообразит, в чем же тут секрет. Таких «двоечников» в популяции Боссу примерно четверть. Они иногда возобновляют попытки, но не могут понять,

что нужны три предмета, и пытаются обойтись двумя. Например, одна семилетняя самка, не научившаяся колоть орехи правильно, время от времени пыталась разбить лежащий на камне орех рукой или ногой (как мы помним, так обычно поступают детеныши в возрасте двух с половиной лет).

Подробно проанализировав факты и мнения, высказанные специалистами на сей счет, Рид заключил, что для того, чтобы колоть орехи, как это принято в Таи, достаточно иметь ОКРП = 2. Для более сложной технологии, практикуемой шимпанзе из Боссу, требуется ОКРП = 3, однако не все особи достигают таких интеллектуальных высот. Вероятно, у тех обезьян, которые так и не осваивают это искусство, кратковременная память в состоянии вместить только два объекта (ОКРП = 2). Теоретически можно предложить и другие объяснения наблюдаемым фактам. Может быть, шимпанзе делят между собой обязанности – одни ищут орехи, другие раскалывают, и поэтому сборщикам не нужно учиться колоть орехи? Рид скрупулезно разобрал это и ряд других возможных объяснений и заключил, что они не подтверждаются фактами.

К аналогичным выводам можно прийти и на основе наблюдений за другими видами орудийной деятельности шимпанзе. Одновременное манипулирование двумя объектами **встречается** сплошь и рядом, тремя – редко, четырьмя – никогда.

Красные кубики налево, зеленые направо. Если дать маленькому ребенку множество различающихся объектов (например, кубиков разного цвета и размера), то иногда ребенок без всяких подсказок начинает раскладывать их на кучки по какому-то принципу. Это дает возможность наблюдать за развитием мышления. Такие эксперименты многократно проводились и с человеческими детьми, и с детенышами других антропоидов.

Дети начинают создавать классификации первого порядка (создание одной группы объектов, объединенных по какому-то признаку, – например, красные кубики) уже в возрасте 12 месяцев. Шимпанзе достигают этой стадии лишь в два года. Создавать одновременно две группы предметов дети начинают в 18 месяцев, шимпанзе – около четырех лет. К трем годам дети уже могут создавать одновременно три группы предметов. Шимпанзе до этой стадии не доходят почти никогда, если не считать нескольких особо одаренных индивидуумов, воспитанных людьми и овладевших речевыми навыками. Для шимпанзе это предел, а дети продолжают развиваться дальше.

Эти результаты, по мнению Рида, опять-таки указывают, что кратковременная рабочая память у шимпанзе вмещает не более 2–3 понятий.

Рид также проанализировал данные по двум знаменитым обезьянам, овладевшим речью (шимпанзе Ним Чимпски и бонобо Канзи). Они научились общаться с людьми при помощи специально разработанной для них системы знаков-слов. Если отбросить высказывания с повторяющимися словами (вроде «дай банан, дай, дай, дай»), то выясняется, что частота употребления фраз у Нима и Канзи убывает экспоненциально по мере роста числа слов в предложении. Обе обезьяны на всю жизнь остались приверженцами односложных высказываний (Ним умер в 2000 году в возрасте 27 лет, Канзи 28 октября 2010 года исполнилось 30). Канзи использует фразы из двух слов примерно в десять раз реже, чем одиночные слова, из трех – в единичных случаях. Более длинные фразы не только крайне редки, но и сомнительны (третье, а тем более четвертое слово-знак обычно не добавляет нового смысла к первым двум знакам). Дети, напротив, уже в возрасте двух лет используют фразы из двух слов чаще, чем односложные высказывания. Ним и Канзи так и не достигли этого уровня.

Точно такое же экспоненциальное убывание частоты событий наблюдается и для манипуляций с объектами (по мере возрастания числа объектов), и для последовательностей жестов (по мере возрастания числа жестов в последовательности).

Обобщив все доступные данные, на основании которых можно судить о динамике увеличения ОКРП с возрастом у человека и других обезьян, Рид пришел к выводу, что разнообразные когнитивные способности, предположительно отражающие величину ОКРП, раньше всего начинают развиваться у людей, позже всего – у низших (нечеловекообразных) обезьян; человекообразные обезьяны занимают промежуточное положение. Скорость, с которой развиваются эти способности, максимальна у человека, минимальна у низших обезьян. Наконец, завершение развития этих способностей происходит раньше всего у низших обезьян, позже всего – у людей; человекообразные, как всегда, посередине.

Таким образом, у людей умственное развитие начинается раньше, идет быстрее и заканчивается позже, чем у других обезьян. В целом интеллектуальное развитие человека и шимпанзе остается более или менее сравнимым примерно до трехлетнего возраста. После этого развитие шимпанзе резко затормаживается, и люди начинают их стремительно опережать. Для шимпанзе все заканчивается в возрасте около четырех лет при уровне ОКРП = 2 или, самое большее, 3. Люди же продолжают развиваться по прежней «траектории», достигая уровня ОКРП ≈ 7 примерно к 12 годам.

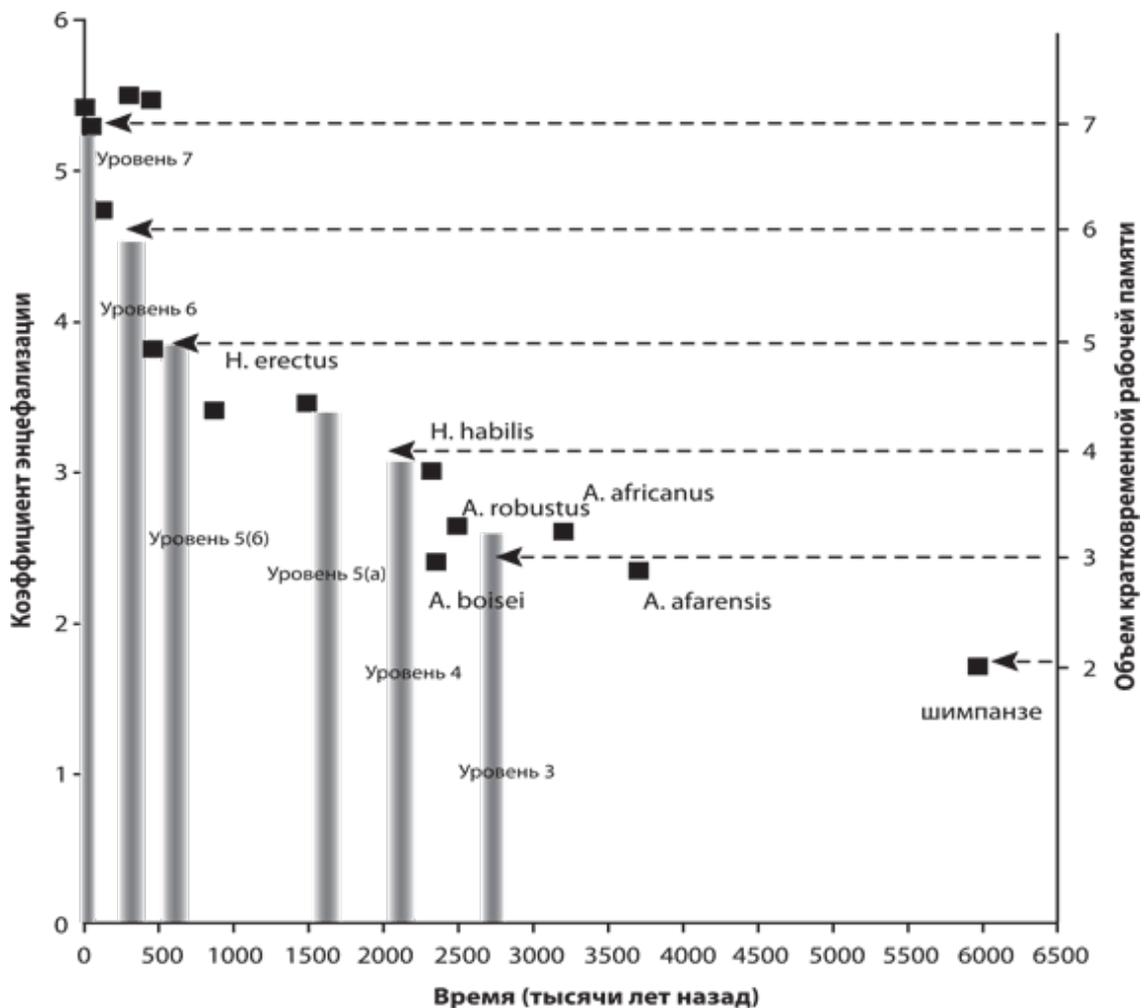
Крайне интересно было бы узнать, хотя и не совсем понятно, какие эксперименты нужно поставить для получения ответа на подобный вопрос, как бы работало человеческое мышление и как была бы устроена наша речь, в особенности ее грамматическая структура (здесь, к слову, стоит упомянуть и о том, что, согласно известной теории Ноама Хомского, в честь которого не без иронии был назван вышеупомянутый шимпанзе Ним Чимпски, у человека имеется «врожденная грамматика» – некое генетически обусловленное представление о грамматической структуре речи, хотя эта теория в настоящее время не разделяется большинством экспертов), и как развивалась бы человеческая культура и наука, если бы наша эволюция не остановилась на достигнутом уровне развития кратковременной рабочей памяти, соответствующем, по мнению большинства психологов, ОКРП ≈ 7 , хотя некоторые, как отмечалось выше, предпочитают более осторожно говорить о величине 7 ± 2 , о чем можно прочесть в недавно вышедшей книге известного психолога и нейробиолога Криса Фрита «Мозг и душа» (2010), которую я настоятельно рекомендую всем, кто интересуется современными достижениями науки о мозге, а продвинулась несколько дальше, обеспечив нас по крайней мере такой величиной ОКРП, при котором произнесение и понимание сложных и длинных, но при этом логично структурированных, внутренне непротиворечивых и даже в какой-то мере осмысленных фраз, подобных этой, не говоря уже о кратких конструкциях с повышенной степенью рекурсивности вроде «напуганный преследуемой выгуливаемой погруженным в рекурсивные размышления человеком собакой кошкой воробей улетел»¹⁵, не составляло бы труда.

Развивая свои идеи, Рид проанализировал развитие палеолитических технологий, а также увеличение размеров мозга, и попытался по этим косвенным признакам выяснить, как менялся в ходе антропогенеза объем кратковременной памяти. Технологии изготовления орудий Рид делит на семь групп по уровню «концептуальной сложности»: от использования готовых палок, от которых нужно только оторвать лишние сучки и листья (уровень 1), до верхнепалеолитической технологии последовательного отщепления множества одинаковых лезвий от одного и того же призматического ядра (уровень 7). По мнению Рида, только технологии уровня 7, появившиеся менее 50 тыс. лет назад, бесспорно являются рекурсивными. Их рекурсивность состоит в том, что лезвия отщепляются не как попало, а с таким расчетом, чтобы одновременно подготовить ядро для отщепления следующего лезвия. При этом нужно

¹⁵ Это калька с английского примера, обнаруженного автором в книге С. А. Бурлак «Происхождение языка» и вернувшего его в глубокую рекурсивную задумчивость: *The cats the dog the men walk chases run away*. По-английски такие фразы выглядят еще ужаснее, чем по-русски, из-за отсутствия грамматических «подсказок» в окончаниях слов.

одновременно держать в голове трехмерную форму ядра, контролировать его позицию и с большой точностью манипулировать отбойником. Технология шестого уровня – леваллуазское расщепление, появившееся свыше 700 тыс. лет назад, но широко распространившееся много позже, в среднем палеолите, – возможно, тоже требовала рекурсивного мышления, но в этом Рид не совсем уверен. Другие авторы указывают на необходимость высокоразвитой ДРП – но не КРП – для овладения леваллуазским мастерством (см. главу «От эректусов к сапиенсам» в кн. 1).

Рид предполагает, что у *Homo habilis*, овладевшего технологией четвертого уровня (олдувайские галечные орудия с одним режущим краем), величина ОКРП составляла около 4. У *Homo erectus* с его обоюдоострыми ашельскими рубилами (уровень 5) ОКРП достиг пяти. У неандертальцев и древнейших сапиенсов, овладевших технологиями шестого уровня, ОКРП была примерно равна шести. Наконец, первые признаки «подлинно человеческой» культуры, появившиеся около 70 тыс. лет назад в Африке, а также несколько более позднее появление технологий седьмого уровня, возможно, маркируют распространение в популяциях *Homo sapiens* генетических вариантов (аллелей), увеличивших производительность исполнительного компонента рабочей памяти и поднявших ОКРП до семи, что открыло перед сапиенсами все возможности полноценного рекурсивного мышления.



Динамика развития технологий, роста размера мозга и объема кратковременной памяти в ходе антропогенеза. По горизонтальной оси – время в тыс. лет назад. По левой вертикальной оси – коэффициент энцефализации, отражающий размер мозга с поправкой на размер тела. По правой вертикальной оси – предполагаемая емкость рабочей памяти

(ОКРП). Серыми вертикальными столбиками показаны моменты появления технологий нового уровня (показаны уровни от третьего до седьмого, так как первые два уровня появились еще до разделения линий человека и шимпанзе). По рисунку из Read, 2008.

Гипотеза Рида выглядит довольно правдоподобно, хотя в ней есть ряд слабо проработанных моментов (например, не очень четко аргументирована связь между величиной ОКРП и способностью к рекурсивному мышлению). Однако генеральная идея о том, что уникальность человеческого интеллекта во многом определяется увеличенным объемом памяти, в том числе кратковременной рабочей, скорее всего верна.

Помимо прочего, большой ОКРП должен повышать новаторско-изобретательский потенциал (*Wynn, Coolidge, 2004*). Выполняя сложную последовательность действий, примат с небольшим ОКРП полностью сосредоточен на ней, у него нет лишних интеллектуальных ресурсов, чтобы помечтать, прикинуть, а нельзя ли решить эту проблему по-другому. Ему трудно смоделировать в голове иные пути достижения цели, отличные от привычного, выученного алгоритма, намертво вбитого в ДРП и доведенного до совершенства за годы практики. Таким образом, теория о ключевой роли ОКРП в антропогенезе хорошо согласуется с обсуждавшимися выше идеями о «стереотипности» мышления шимпанзе и других нечеловеческих гоминоидов.

Глава 2

Душевная механика

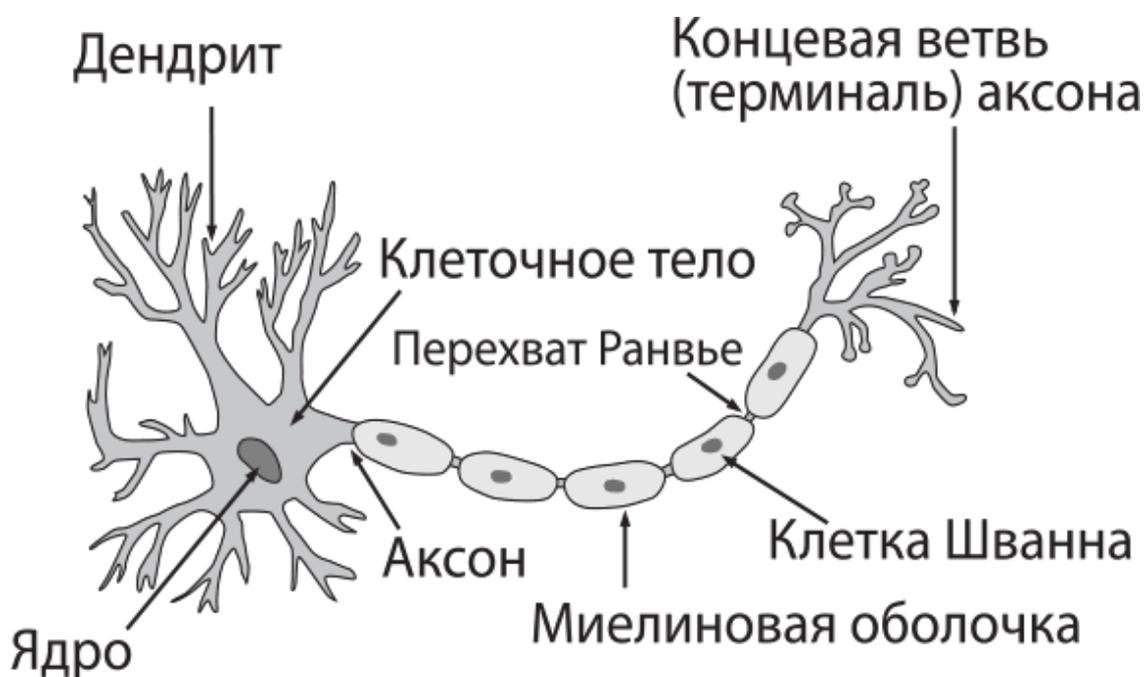
Универсальный аппарат для принятия решений

Психика, она же душа, является результатом работы мозга. Мозг сделан из нервных клеток – нейронов. Мы не будем вдаваться в тонкие детали устройства нервных клеток, ведь эта книга не учебник по нейробиологии. Но несколько базовых фактов все-таки придется привести, потому что без них трудно понять нашу душевную механику.

Нейрон – универсальное живое устройство для принятия решений. Это главное, что нам следует о нем знать.

Я чуть было не назвал его простейшим или элементарным устройством, но вовремя вспомнил, что есть и более простые биологические структуры, способные к принятию решений: разнообразные биохимические и генетические «переключатели» (Казанцева, 2011). Однако нейроны действительно являются элементарными устройствами – в том смысле, что из них (в отличие от генетических переключателей) можно собрать вычислительную схему или аппарат для принятия решений *практически любой* степени сложности и эффективности.

Два слова о строении нейрона. У него есть центральная толстенькая часть – «тело», в котором находится клеточное ядро с генами. От тела отходят два вида отростков: «входные» (дендриты) и «выходные» (аксоны). Дендритов обычно много, а аксон, как правило, один, но на конце он может ветвиться.



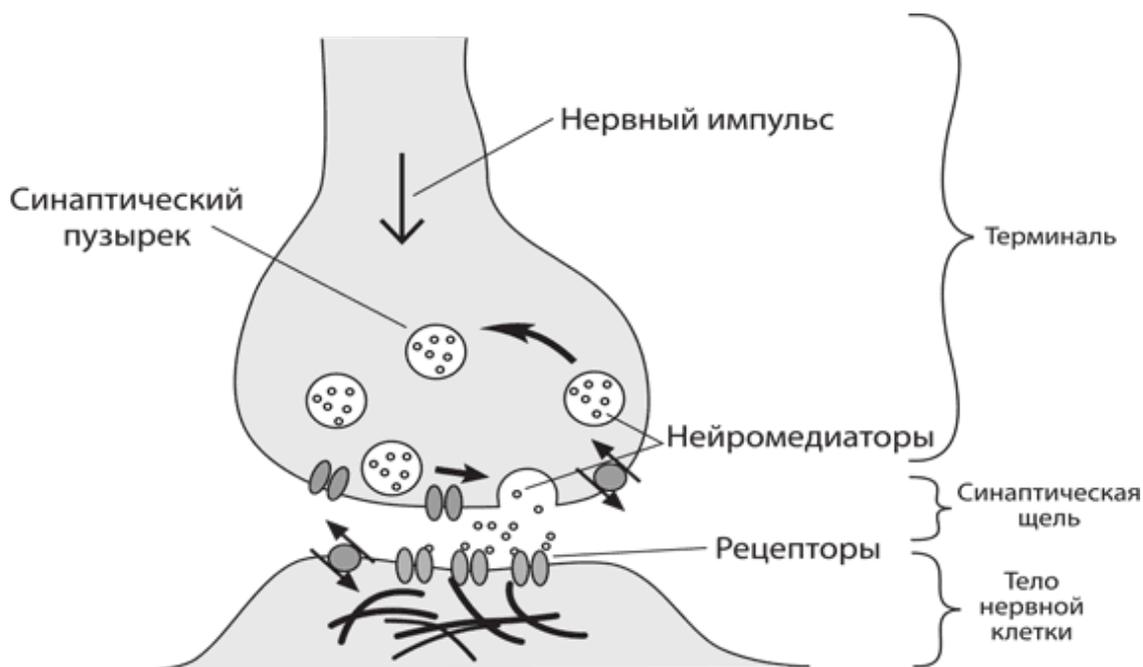
Типичная структура нейрона.

Главная задача дендритов – сбор информации. Они могут получать сигналы от специальных белков-рецепторов (например, обонятельных, вкусовых или светочувствительных), реагирующих на факторы внешней или внутренней среды, и в этом случае нейрон называ-

ется сенсорным. Но в большинстве случаев дендриты получают сигналы от других нейронов, чаще всего – от их аксонов. Для того чтобы обмениваться сигналами, нейроны используют специальные вещества – *нейромедиаторы*. В нервной системе животных используются десятки разных нейромедиаторов, и мы будем с ними знакомиться по мере необходимости. Нейромедиаторы выделяются концевыми веточками аксонов, а воспринимаются специализированными белками-рецепторами, расположенными на поверхности дендрита (впрочем, не только: рецепторы, чувствительные к нейромедиаторам, могут располагаться и на теле клетки, и на аксоне).

Как правило, передача сигнала от аксона одного нейрона к дендриту или иной части другого нейрона осуществляется в специальной контактной зоне, которая называется синапсом. Главные составные части синапса – это *пресинаптическая мембрана* окончания аксона, через которую выделяется нейромедиатор, *синаптическая щель* – пространство между мембранами двух нейронов и *постсинаптическая мембрана*, принадлежащая нейрону, принимающему сигнал. На постсинаптической мембране расположены белки-рецепторы, реагирующие на нейромедиатор. Передача сигнала в синапсе – однонаправленная.

Кроме обычных, химических синапсов, в которых сигнал от нейрона к нейрону передается при помощи нейромедиаторов, бывают еще электрические синапсы, но они играют менее важную роль, и в нашем рассказе мы постараемся без них обойтись.



Типичная структура синапса (межнейронного контакта). В окончании аксона (терминали) производятся нейромедиаторы (особые сигнальные вещества, при помощи которых нейроны общаются друг с другом). Когда по аксону к терминали приходит электрический нервный импульс, нейромедиаторы из синаптических пузырьков выбрасываются в синаптическую щель. Здесь они взаимодействуют с рецепторами, расположенными на мембране “принимающего” нейрона (внизу). Кроме рецепторов, на мембранах нейронов есть белки, осуществляющие откачку нейромедиаторов из синаптической щели. Остальные пояснения см. в тексте.

Синапсы позволяют передавать сигнал от одного нейрона к другому индивидуально, точно и аккуратно. Это все равно что шепнуть кому-то на ухо важное сообщение: до адресата информация дойдет, а остальные ничего не узнают. Но нейроны могут и «разговаривать вслух», так что слышат все, кто находится поблизости и у кого есть подходящие

«уши» (рецепторы). Это называется *внесинаптической передачей*. Бывает внесинаптическое выделение нейромедиаторов, и бывают внесинаптические рецепторы, реагирующие на такие разлитые в межклеточном пространстве нейромедиаторы (которые в этом случае иногда называют нейромодуляторами). Это удобно, если надо донести сигнал сразу до всех нейронов, расположенных в данном участке мозга и имеющих подходящие рецепторы. Как правило, так распространяется информация самого общего характера, которую не надо анализировать в мелких деталях. С информацией, поступающей от глаз, когда мы читаем книгу, так не поработаешь: здесь нужно разбираться в мелочах, распознавать буквы и слова, здесь нужны синапсы. А вот для того, чтобы сгенерировать чувство удовольствия или другую *эмоцию*, внесинаптическая передача подходит в самый раз.

Нейромедиаторы и синапсы делятся на возбуждающие и тормозящие¹⁶. Когда нейрон получает возбуждающий сигнал, это повышает вероятность того, что нейрон возбудится, то есть сгенерирует электрический нервный импульс, который побежит по аксону до самых его кончиков и вызовет выброс нейромедиатора. Тормозящие сигналы, напротив, снижают вероятность этого события.

У одного нейрона могут быть тысячи «пунктов приема информации» – постсинаптических мембран, не говоря уж о внесинаптических рецепторах. Таким образом, нейрон собирает большое количество данных из окружающего мира. Речь идет, конечно, о мире, окружающем нервную клетку, а не вас. Эти данные имеют вид сложного аккорда из множества возбуждающих и тормозящих сигналов.

На основе собранных данных нейрон делает одно из двух: либо возбуждается, либо нет. Нейрон «рассуждает» строго дискретно, категориально. Он интегрирует обширную информацию и принимает на ее основе одно из двух возможных решений. Все переливы и полутона входящих сигналов превращаются в черное или белое, в «да» или «нет». Если общая сумма возбуждающих сигналов превосходит общую сумму тормозящих сигналов на некую вполне определенную величину, нейрон возбуждается – производит нервный импульс (его еще называют *потенциалом действия*), который бежит по аксону прочь от тела нейрона, добегает до аксонных окончаний и заставляет их выбросить порцию нейромедиатора. Она в свою очередь будет воспринята каким-то другим нейроном как сигнал – либо тормозящий, либо возбуждающий.

Сила переданного сигнала, то есть размер порции нейромедиатора, выброшенного нервным окончанием, не зависит от силы потенциала действия. Последнюю можно, как в компьютере, считать равной 0 или 1 – все или ничего. Размер выброшенной порции медиатора зависит лишь от состояния нервного окончания в данный момент. Чем определяется это состояние, будет сказано ниже. Пока лишь запомним, что порция может быть разной, а от потенциала действия зависит лишь, будет она выброшена или нет.

Механизм возбуждения нейрона основан на перекачке заряженных частиц (ионов) из цитоплазмы клетки во внешнюю среду или обратно. В спокойном состоянии мембрана нейрона поляризована: у ее внутренней стороны скапливаются отрицательно заряженные частицы, у наружной преобладают заряженные положительно, в том числе ионы натрия Na^+ . Если нейрон «решает» возбудиться, в его мембране открываются особые ворота – натриевые каналы, по которым ионы натрия устремляются внутрь клетки, притягиваемые скопившимися там отрицательными зарядами. Это приводит к *деполяризации* – выравниванию электрических потенциалов по обе стороны мембраны.

¹⁶ Было бы легче во всем разобраться, если бы каждый синапс работал только на одном нейромедиаторе. В действительности это не всегда так, но все же, как правило, в каждом синапсе есть «основной» нейромедиатор, который является или возбуждающим, или тормозящим.

Деполаризация «заразна»: когда один участок мембраны деполаризуется, это стимулирует деполаризацию соседних участков. В результате волна деполаризации быстро бежит по аксону. Это, собственно, и есть потенциал действия, он же нервный импульс.

После каждого импульса нейрону нужно некоторое время, чтобы перекачать ионы натрия из клетки обратно на наружную сторону мембраны и тем самым снова привести мембрану в «рабочее», то есть поляризованное состояние. Пока это не сделано, нейрон не может сгенерировать новый нервный импульс.

На самом деле, конечно, все гораздо сложнее^[1]. Описанная картина так сильно упрощена, что автор даже опасается, как бы специалисты-нейробиологи не обвинили его в дезинформировании населения. Но это, напомню, не учебник, а для понимания того, о чем пойдет речь в этой и последующих главах, сказанного достаточно. Более полную и подробную информацию о работе нейронов читатель может без труда найти в соответствующих учебниках, справочниках или в интернете. Достаточно сделать поиск по словам «нейрон», «синапс» и «потенциал действия».

Итак, нейрон собирает большое количество разнородной информации и обобщает (интегрирует) ее, сводя все разнообразие полученных сведений к выбору одного из двух решений: «выстрелить» потенциалом действия, передав тем самым обобщенный итог своих раздумий другим нейронам, или не делать этого. Отсутствие сигнала тоже в некотором смысле является сигналом: оно сигнализирует о том, что данный нейрон, обобщив все доступные ему данные, принял решение пока не возбуждаться.

Свойственный нейронам максимализм (принцип «все или ничего») не абсолютен. Это справедливо только для отдельного потенциала действия. Но нейроны работают в реальном времени, и когда они получают очень много возбуждающих сигналов, они раздражаются быстрой серией потенциалов действия, следующих один за другим, – строчат как пулемет (едва успевая перед каждым новым «выстрелом» перекачать ионы натрия из клетки наружу). Если возбуждающих сигналов становится меньше, частота импульсов соответственно снижается. Таким образом, нейрон может передавать и количественную информацию, которая кодируется частотой импульсов.

Сегодня, когда каждый человек хоть немного, но знаком с принципами работы компьютеров, никому из прочитавших это описание, наверное, не нужно долго объяснять, что нейрон – превосходный элементарный блок для сборки вычислительных устройств любой степени сложности. Даже таких сложных, как человеческий разум.

В мозге человека, по современным оценкам, примерно 100 млрд (10^{11}) нейронов (в мозге мыши – около 10^7 , в мозге мушки дрозофилы – примерно 10^5). Типичный нейрон имеет от 10^3 до 10^4 синапсов. Итого получаем 10^{14} — 10^{15} синапсов на душу населения. Даже самое примитивное, свехупрощенное и свехсжатое описание структуры синаптических связей мозга, отражающее только то, какие два нейрона контактируют при помощи данного синапса (указываем для каждого синапса два числа – порядковые номера нейронов, по 4 байта на номер), едва поместится на жесткий диск емкостью в 1000 терабайт. Это называется петабайт, и таких дисков, насколько мне известно, еще не делают. Мозг – серьезное устройство, современным компьютерам до него очень далеко.

Чем мозг отличается от компьютера

Некоторые отличия мы уже знаем. В компьютере все сигналы, которыми обмениваются элементы логических схем, имеют одну и ту же природу – электрическую, и сигналы эти могут принимать только одно из двух значений – 0 или 1. Передача информации в мозге основана не на двоичном коде, а скорее на троичном. Если возбуждающий сигнал соотнести с единицей, а его отсутствие – с нулем, то тормозящий сигнал, пожалуй, можно уподобить минус единице. Но это все-таки чрезмерное упрощение. На самом деле в мозге используются химические сигналы нескольких десятков типов – все равно как если бы в компьютере использовались десятки *разных* электрических токов (или наряду с электричеством использовались световые лучи, струйки воды, зубчатые передачи, потоки воздуха и много всего другого), а нули и единицы могли бы иметь десятки разных... ну, скажем, цветов или каких-то иных качеств.

В принципе можно представить себе мозг, работающий только на одном нейромедиаторе. Или на двух – одном возбуждающем и одном тормозящем. Но тогда пришлось бы обходиться без нейромодуляторов и без внесинаптической передачи. Выброс универсального нейромедиатора во внеклеточное пространство и его восприятие внесинаптическими рецепторами в таком мозге были бы похожи на короткое замыкание. Без возможности выбрасывать разные медиаторы по выбору внесинаптическая передача потеряла бы смысл. Значит, все логические схемы пришлось бы четко и однозначно «прошивать» в железе, то есть фиксировать в системе синаптических связей. Это создало бы технические трудности при кодировании таких «общесистемных» сигналов (или настроек), как эмоции. Это создало бы еще более серьезные проблемы с гормональной регуляцией жизнедеятельности, поскольку гормональная регуляция – естественное продолжение нервной. Многие нейромедиаторы по совместительству являются и важнейшими гормонами (*Жуков, 2007*). Ко всем органам, работа которых управляется гормонами, пришлось бы «тянуть» дополнительные нервы – и это только одна из проблем.

Я готов допустить, что эти трудности преодолимы. Не исключено, что где-то на других планетах живут существа с мозгом, работающим на двух медиаторах. Но на нашей планете множественность нейромедиаторов является для нас, животных, очень древним эволюционным наследием, которое тянется за нами с тех незапамятных времен (более 700 млн лет назад), когда у примитивных многоклеточных еще не было нормальной нервной системы с синапсами, а клетки общались между собой при помощи разнообразных химических сигналов. Химическая регуляция взаимоотношений между клетками эволюционно гораздо древнее, чем нервная система. Многие нейромедиаторы и нейрогормоны пришли к нам прямо из эпохи первых многоклеточных или даже из еще более ранней эпохи социальных одноклеточных – предков животных. Задолго до того, как некоторые из клеток стали нейронами, клетки уже общались между собой при помощи тех же самых нейромедиаторов и гормонов, которые и поныне используются в нервно-гормональной системе высших животных.

Еще одно ключевое отличие мозга от компьютера связано с тем, что сила сигнала, передаваемого от одного нейрона к другому (количество выделенного нейромедиатора), может меняться не дискретно (0 или 1), а плавно. Дискретность распространяется только на факт наличия или отсутствия сигнала – выброшенной нервной окончанием порции нейромедиатора, но не на размер этой порции. Плавно может меняться и *чувствительность* принимающего нейрона к сигналам, поступающим через данный синапс. Эта чувствительность зависит от количества и качества рецепторов, сидящих на постсинаптической мембране принимающего нейрона.

Самое же главное отличие состоит в том, что *проводимость* каждого конкретного синапса (определяемая количеством нейромедиатора, поступающего через пресинаптическую мембрану, и чувствительностью постсинаптической мембраны к этому нейромедиатору) может меняться в зависимости от обстоятельств. Это свойство называют *синаптической пластичностью*. Именно синаптическая пластичность лежит в основе способности комплексов взаимосвязанных нейронов (нейронных контуров или сетей) к запоминанию и обучению.

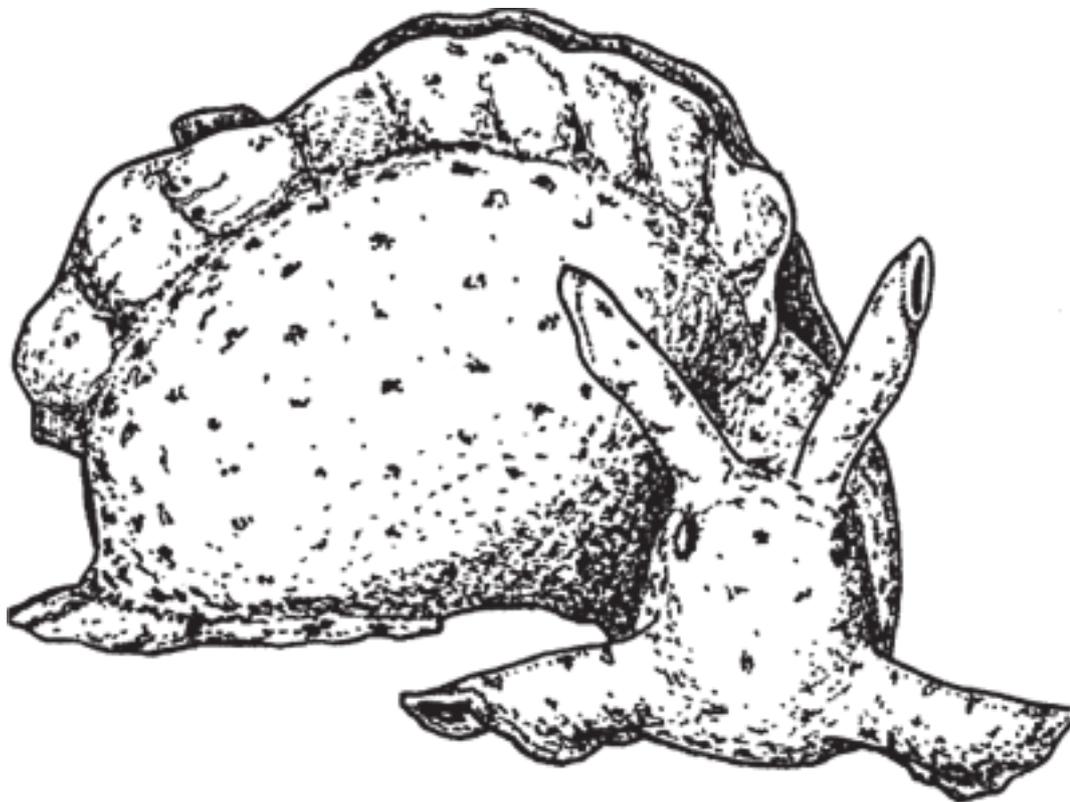
Есть и еще одно радикальное отличие мозга от электронно-вычислительной машины. В компьютере основной объем памяти хранится не в логических электронных схемах процессора, а отдельно, в специальных запоминающих устройствах. В мозге вся память записана в той же самой структуре межнейронных синаптических связей, которая *одновременно является* и грандиозным вычислительным устройством – аналогом процессора. Участков мозга, специально выделенных для длительного хранения воспоминаний, не существует. Мы помним лицо знакомого человека теми же самыми нервными клетками, которые это лицо воспринимают и распознают.

Запоминающее устройство можно собрать из трех нейронов

Нам пора поближе познакомиться с устройством памяти. Расшифровка ее клеточно-молекулярной природы – одно из самых блестящих достижений нейробиологии XX века. Нобелевский лауреат Эрик Кандель и его коллеги сумели показать, что для формирования самой настоящей памяти – как кратковременной, так и долговременной – достаточно всего трех нейронов, определенным образом соединенных между собой.

Память изучалась на примере формирования условного рефлекса у гигантского моллюска – морского зайца *Aplysia*. У этого моллюска нервная система очень проста и удобна для изучения – нейронов в ней мало, и они очень крупные. Моллюску осторожно трогали сифон и тотчас вслед за этим сильно били по хвосту. После такого однократного «обучения» моллюск некоторое время реагирует на легкое прикосновение к сифону бурной защитной реакцией, но вскоре все забывает (кратковременная память). Если «обучение» повторить несколько раз, формируется стойкий условный рефлекс (долговременная память).

Оказалось, что процесс запоминания организован довольно просто и сводится к ряду автоматических реакций на уровне отдельных нейронов. Весь процесс можно полностью воспроизвести на простейшей системе из трех изолированных нервных клеток. Один нейрон (*сенсорный*) получает сигнал от сифона (в данном случае – чувствует легкое прикосновение). Сенсорный нейрон передает импульс *моторному* нейрону, который в свою очередь заставляет сокращаться мышцы, участвующие в защитной реакции (*Aplysia* втягивает жабру и выбрасывает в воду порцию красных чернил). Информация об ударе по хвосту поступает от третьего нейрона, который в данном случае играет роль *модулирующего*.

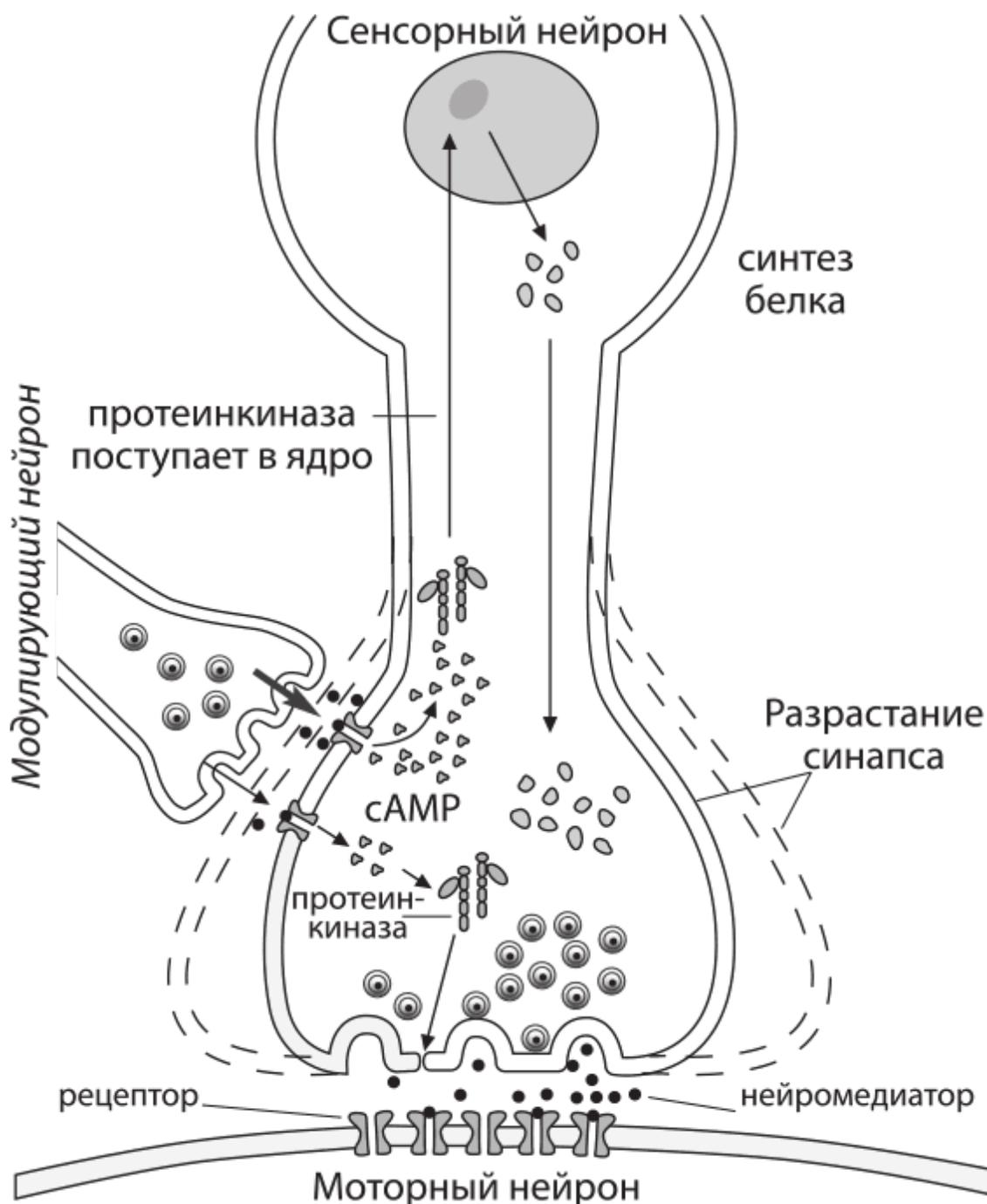


Гигантский морской моллюск аплизия.

На рисунке показаны два синапса. Первый служит для передачи импульса от сенсорного нейрона к моторному. Второй синапс передает импульс от модулирующего нейрона к окончанию сенсорного.

Возьмем необученного, «наивного» моллюска. Если в момент прикосновения к сифону модулирующий нейрон «молчит» (по хвосту не бьют), в синапсе 1 выбрасывается мало нейромедиатора, и моторный нейрон не возбуждается.

Однако удар по хвосту приводит к выбросу нейромедиатора в синапсе 2, что вызывает важные изменения в поведении синапса 1. В окончании сенсорного нейрона вырабатывается сигнальное вещество цАМФ (циклический аденозинмоно-фосфат). Это вещество активирует регуляторный белок – протеинкиназу А. Протеинкиназа А в свою очередь активирует другие белки, что в конечном счете приводит к тому, что синапс 1 при возбуждении сенсорного нейрона (то есть в ответ на прикосновение к сифону) начинает выбрасывать больше нейромедиатора, и моторный нейрон возбуждается. Это и есть *кратковременная память*: пока в окончании сенсорного нейрона много активной протеинкиназы А, передача сигнала от сифона к мышцам жабры и чернильного мешка осуществляется более эффективно.



За эту картинку Эрику Канделю дали Нобелевскую премию. Здесь показано, как в простейшей системе из трех нейронов формируется кратковременная и долговременная память.

Если прикосновение к сифону сопровождалось ударом по хвосту много раз подряд, протеинкиназы А становится так много, что она проникает в ядро сенсорного нейрона. Это приводит к активизации другого регуляторного белка – транскрипционного фактора CREB. Белок CREB «включает» целый ряд генов, работа которых в конечном счете приводит к *разрастанию* синапса 1 (как показано на рисунке) или к тому, что у окончания сенсорного нейрона вырастают дополнительные отростки, которые образуют новые синаптические контакты с моторным нейроном. В обоих случаях эффект один: теперь даже слабого возбуждения сенсорного нейрона оказывается достаточно, чтобы возбудить моторный нейрон. Это и есть *долговременная память*.

Остается добавить, что, как показали дальнейшие исследования, у других животных, включая нас с вами, память основана на тех же принципах, что и у аплизии. Память – это проторенные дороги в нейронных сетях. Это пути, по которым нервные импульсы проходят легче благодаря повышенной синаптической проводимости.

Когда мы воспринимаем что-нибудь – любую информацию из внешней или внутренней среды, – нервные импульсы пробегают по каким-то определенным путям в гигантской нейронной сети, которой является наш мозг. Логические схемы, составленные из множества нейронов, обрабатывают поступающие сигналы, обобщают их, раскладывают по полочкам. Например, зрительная информация – нервные импульсы, приходящие от фоторецепторов сетчатки глаза, – сначала сортируется по простым категориям: вертикальные линии, горизонтальные линии, данные о движении и т. д. Затем постепенно, в несколько этапов, передаваясь от одних групп нейронов другим, из этих элементов складывается целостный образ увиденного, «картинка», удобная модель реальности, с которой можно работать дальше. На основе хорошей, качественной картинка-модели^[2] можно просчитать оптимальную тактику своего поведения, то есть последовательность нервных импульсов, которые нужно послать мышцам, чтобы совершить нужные телодвижения. Например, убежать как можно быстрее и дальше, если распознанная «картинка» идентифицирована как нечто опасное – скажем, крупный хищник. Физическая природа «картинки», как и всего остального, что происходит в нашей душе, – это определенный рисунок (паттерн) возбуждения нейронов, все те же нервные импульсы, пробегающие по определенным путям в сплетениях аксонов и дендритов. Чтобы надолго запомнить данную картинку – скажем, тигриную морду, выглянувшую из-за пальмы, – нужно просто усилить синаптическую проводимость вдоль всего пути следования импульсов, формирующих именно эту картинку. И тогда достаточно будет легкого напоминания – запах, шорох, пара полосок, желтый глаз, – и по проторенному пути сразу пробегут такие же нервные импульсы, как при первой встрече. Возникнет мысленный образ тигра.

Мы рождаемся не с кашей в голове. Мы рождаемся с нейронами мозга, уже каким-то образом соединенными между собой в громадную, сложнейшую сеть. Каким именно образом они соединятся в процессе эмбрионального развития, зависит от генов. Какие из бесчисленного множества возможных путей для прохождения нервных импульсов будут от рождения более проторенными, чем другие, тоже зависит от генов. Из этого неизбежно следует, что по крайней мере некоторые наши знания вполне могут быть врожденными. Для того чтобы от рождения иметь в голове образ тигра – обладать врожденным знанием о том, как выглядит тигр, – нужно лишь одно. Нужно, чтобы отбор закрепил в нашем геноме такие мутации генов – регуляторов развития мозга, которые от рождения обеспечивали бы повышенную синаптическую проводимость вдоль того пути следования нервных импульсов, по которому они пробежали при встрече с тигром у наших предков, еще не имевших этого врожденного знания.

Разумеется, знания могут быть не полностью, а лишь отчасти врожденными. Это значит, что соответствующий нейронный маршрут будет от рождения проторен лишь отчасти, недостаточно сильно или не на всем протяжении. Тогда нужно будет немного «довести» врожденное полужнание при помощи обучения. Частичная врожденность, конечно, делает обучение гораздо более легким и быстрым.

По всей видимости, у людей действительно есть кое-какие врожденные «заготовки» зрительных образов: например, новорожденные дети иначе реагируют на вертикальный овал с большой буквой Т посередине (похоже на лицо), чем на другие геометрические фигуры. Удивительная легкость, с которой маленькие дети овладевают речью, тоже объясняется наличием некоего врожденного «полужнания», то есть предрасположенности к легкому усвоению знаний определенного рода.

Могут существовать и такие знания, которым очень трудно или даже вовсе невозможно научиться, потому что врожденная структура межнейронных связей не предусматривает такой возможности. Скажем, в вышеприведенном примере с аплизией мы приняли как данность, что модулирующий нейрон, возбуждающийся при ударе по хвосту, имеет аксонный отросток, контактирующий с окончанием сенсорного нейрона, реагирующего на прикосновение к сифону. А если бы такого отростка не было, если бы модулирующий нейрон не имел синаптических контактов с окончанием сенсорного нейрона? Или, иными словами, если бы врожденная структура нейронной сети аплизии не предусматривала возможности передачи сигнала от хвоста к окончанию сенсорного нейрона сифона? В таком случае аплизия оказалась бы не способной к данному виду обучения. Мы просто не смогли бы *посредством ударов по хвосту* научить ее выбрасывать чернила в ответ на прикосновение к сифону. Скорее всего, в этом случае мы сумели бы найти ударам по хвосту какую-то замену. Мы подобрали бы такое «обучающее воздействие», которое возбуждало бы нейроны, *имеющие* (в отличие от нейронов хвоста) синаптические контакты с окончаниями сенсорных нейронов сифона.

Нейроны мозга от рождения соединены между собой лишь каким-то одним способом из бесконечного числа возможных. Из этого следует, что любое животное, включая человека, чему-то научиться может, а чему-то нет. Одни науки даются нам легко, другие трудно. Абсолютно универсальных мозгов не бывает. Любой мозг специализирован, «заточен» под решение определенного – пусть и очень широкого – круга задач. Он принципиально не способен решать задачи, лежащие за пределами этого круга. Возможно, человеческий мозг более универсален, чем мозги других животных, но *абсолютная* универсальность – не более чем несбыточная мечта.

Нейроны соревнуются за право запоминать

Часто бывает так, что одни и те же важные сигналы, подлежащие запоминанию, принимаются одновременно очень многими нейронами. Нужно ли им всем участвовать в запоминании? На первый взгляд кажется, что это не слишком рационально. Ведь количество проторенных путей, которые может пропустить через себя один и тот же нейрон, ограничено – объем памяти не бесконечен. Сэкономить и записать важную информацию только в части задействованных нейронов – вроде бы неплохая идея. Как недавно выяснилось, именно это и происходит в мозге млекопитающих. Нейронам, воспринимающим одну и ту же достойную запоминания информацию, как-то удается договориться между собой, кто из них будет, а кто не будет отращивать себе новые отростки и синапсы.

Это явление описали канадские и американские нейробиологи, изучавшие формирование у лабораторных мышей условных рефлексов, связанных со страхом (*Han et al., 2007*). Простейшие рефлексы такого рода и у мышей, и у людей, и у всех прочих млекопитающих формируются в латеральной миндалине (ЛМ) – маленьком отделе мозга, отвечающем за реакции организма на всякие пугающие стимулы. Мышей приучали, что после того, как раздастся определенный звук, их бьет током. В ответ на удар током мышь замирает: это стандартная реакция на испуг. Мыши – умные зверьки, их можно научить многому, и условные рефлексы у них формируются быстро. Обученные мыши замирают, едва услышав звук, предвещающий опасность.

Ученые обнаружили, что сигнал от нейронов, воспринимающих звук, поступает примерно в 70 % нейронов латеральной миндалины. Однако изменения, связанные с формированием долговременной памяти (разрастание синапсов и рост новых нервных окончаний), у обученных мышей происходят лишь в четвертой части этих нейронов (примерно у 18 % нейронов ЛМ).

Ученые предположили, что между нейронами ЛМ, потенциально способными принять участие в формировании долговременной памяти, происходит своеобразное соревнование за право отрастить новые синапсы, причем вероятность «успеха» того или иного нейрона зависит от концентрации белка CREB в его ядре. Чтобы проверить это предположение, мышам делались микроинъекции искусственных вирусов, не способных к размножению, но способных производить полноценный белок CREB либо его нефункциональный аналог CREBS_{133A}. Гены обоих этих белков, вставленные в геном вируса, были «пришиты» к гену зеленого флуоресцирующего белка медузы. В итоге ядра тех нейронов ЛМ, в которые попал вирус, начинали светиться зеленым.

Выяснилось, что в результате микроинъекции вирус проникает примерно в такое же количество нейронов ЛМ, какое участвует в формировании условного рефлекса. Это случайное совпадение оказалось весьма удобным.

Помимо нормальных мышей в опытах использовались мыши-мутанты, у которых не работает ген CREB. Такие мыши напрочь лишены способности к обучению, они ничего не могут запомнить. Оказалось, что введение вируса, производящего CREB, в ЛМ таких мышей полностью восстанавливает способность к формированию условного рефлекса. Но, может быть, увеличение концентрации CREB в некоторых нейронах ЛМ просто усиливает реакцию замирания?

Чтобы проверить это, были поставлены опыты с более сложным обучением, в которых мышь должна была «осознать» связь между звуком и ударом тока не напрямую, а опосредованно, причем для этого требовалось запомнить определенный контекст, в котором происходило обучение. Для этого недостаточно работы одной лишь ЛМ, а требуется еще и участие гиппокампа. В такой ситуации мыши-мутанты не смогли ничему научиться, ведь в гиппо-

кампа¹⁷ им вирусов не вводили. Следовательно, концентрация CREB влияет именно на запоминание, а не на склонность к замиранию.

При помощи дополнительных экспериментов удалось доказать, что в запоминании у мышей-мутантов участвуют именно те нейроны ЛМ, которые заразились вирусом. Введение вируса в ЛМ здоровых мышей не повлияло на их обучаемость. Однако, как и в случае с мышами-мутантами, в запоминании участвовали именно те нейроны ЛМ, в которые попал вирус.

Другой вирус, производящий CREBS_{133A}, лишает зараженные нейроны способности запоминать, то есть отращивать новые окончания. Ученые предположили, что введение этого вируса в ЛМ здоровых мышей не должно тем не менее снижать их обучаемость, поскольку вирус заражает лишь около 20 % нейронов ЛМ и роль «запоминающих» возьмут на себя другие, не заразившиеся нейроны. Так и оказалось. Мыши обучались нормально, но среди нейронов, принявших участие в запоминании, практически не оказалось зараженных (то есть светящихся зеленым светом). Ученые провели еще целый ряд сложных экспериментов, что позволило исключить все иные варианты объяснений, кроме одного – того самого, которое соответствовало их начальному предположению.

Таким образом, в запоминании участвуют не все нейроны, получающие необходимую для этого информацию (в данном случае – «сенсорную» информацию о звуке и «модулирующую» – об ударе током). Почетную роль запоминающих берет на себя лишь некоторая часть этих нейронов, а именно те, в ядрах которых оказалось больше белка CREB. Это, в общем, логично, поскольку высокая концентрация CREB в ядре как раз и делает такие нейроны наиболее «предрасположенными» к быстрому отращиванию новых окончаний.

Неясным остается механизм, посредством которого другие нейроны узнают, что дело уже сделано, победители названы и им самим уже не нужно ничего себе отращивать.

Этот механизм может быть довольно простым. Аналогичные системы регуляции, основанные на отрицательных обратных связях, часто встречаются в живой природе. Например, у нитчатых цианобактерий, нити которых состоят из двух типов клеток: обычных, занимающихся фотосинтезом, и специализированных гетероцист, занимающихся фиксацией атмосферного азота. Система работает очень просто: когда сообществу недостает азота, фотосинтезирующие клетки начинают превращаться в гетероцисты. Процесс до определенного момента является обратимым. Клетки, зашедшие по этому пути достаточно далеко, начинают выделять сигнальное вещество, которое не дает превратиться в гетероцисты соседним клеткам. В результате получается нить с неким вполне определенным соотношением обычных клеток и гетероцист (например, 1:20), причем гетероцисты располагаются примерно на равном расстоянии друг от друга.

На мой взгляд, называть подобные регуляторные механизмы конкуренцией, как это делают авторы статьи, не совсем правильно, акцент тут должен быть иной. Нейрон не получает никакой личной выгоды от того, что именно он примет участие в запоминании. Поэтому, здесь уместнее говорить не о конкуренции, а о кооперации.

Томография мозга

Для изучения работы мозга используется множество методов, каждый из которых, как водится, имеет свои плюсы и минусы и свою область

¹⁷ Гиппокамп – часть так называемой лимбической системы мозга. Выполняет несколько важных функций, включая управление запоминанием пережитых событий. В том числе – путем многократного «прокручивания» дневных воспоминаний во время сна. Люди с удаленным гиппокампом помнят все, что было с ними до операции, но не могут запомнить ничего нового (см. ниже).

применения. Если вы работаете с аплизиями, мышами или мухами, можно использовать любые методы. Хотите – создавайте генно-модифицированных животных со светящимися нейронами, которые можно разглядывать сквозь череп при помощи специального микроскопа, хотите – втыкайте микроэлектроды в интересующие вас нейроны и регистрируйте нервные импульсы, хотите – нарежьте мозг тонкими ломтиками и изучайте работу нейронов и проводимость синапсов, пока клетки еще живые (делают и так). Мышей, правда, жалко.

С обезьянами, включая человека, так поступать нельзя. Здесь генно-инженерные методы запрещены, равно как и сверление отверстий в черепе в научных целях. И тут на помощь приходят неинвазивные (то есть не требующие непосредственного вмешательства в мозг) методы. Они, как правило, совершенно (или почти) безвредны, а некоторые из них позволяют наблюдать за работой мозга в реальном времени. Наиболее интересные результаты дают различные виды компьютерной томографии, позволяющие получать объемные изображения мозга (или других органов) путем компьютерной обработки множества послойных снимков. *Рентгеновская томография* применяется для изучения анатомии мозга. *Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ)*, часто применяемая совместно с рентгеновской, позволяет отслеживать участки мозга, наиболее активные в данный момент. Для этого человеку или другому животному вводят в кровь небольшое количество радиоактивного элемента (такого как фтор-18), который при распаде излучает позитроны. Позитроны сталкиваются с электронами и аннигилируют, испуская два гамма-кванта. Их-то и регистрирует прибор. Когда какой-то участок мозга начинает активно работать, к нему приливает больше крови. Соответственно, там становится больше радионуклидов и оттуда вылетает больше гамма-квантов. Звучит все это довольно устрашающе, но на самом деле процедура вполне безвредна, поскольку используемые количества радионуклидов ничтожны. *Функциональная магнитно-резонансная томография (ФМРТ)* позволяет обойтись и без рентгеновского излучения, и без введения радионуклидов: дело ограничивается тем, что голову помещают в мощное магнитное поле и пропускают сквозь нее радиоволны. Как и ПЭТ, данный метод регистрирует приток крови к активно работающим участкам мозга. Только этот приток определяется не по радионуклидам, а по оксигемоглобину (гемоглобину, соединенному с кислородом): чем больше в данном участке мозга оксигемоглобина, тем сильнее магнитно-резонансный сигнал.

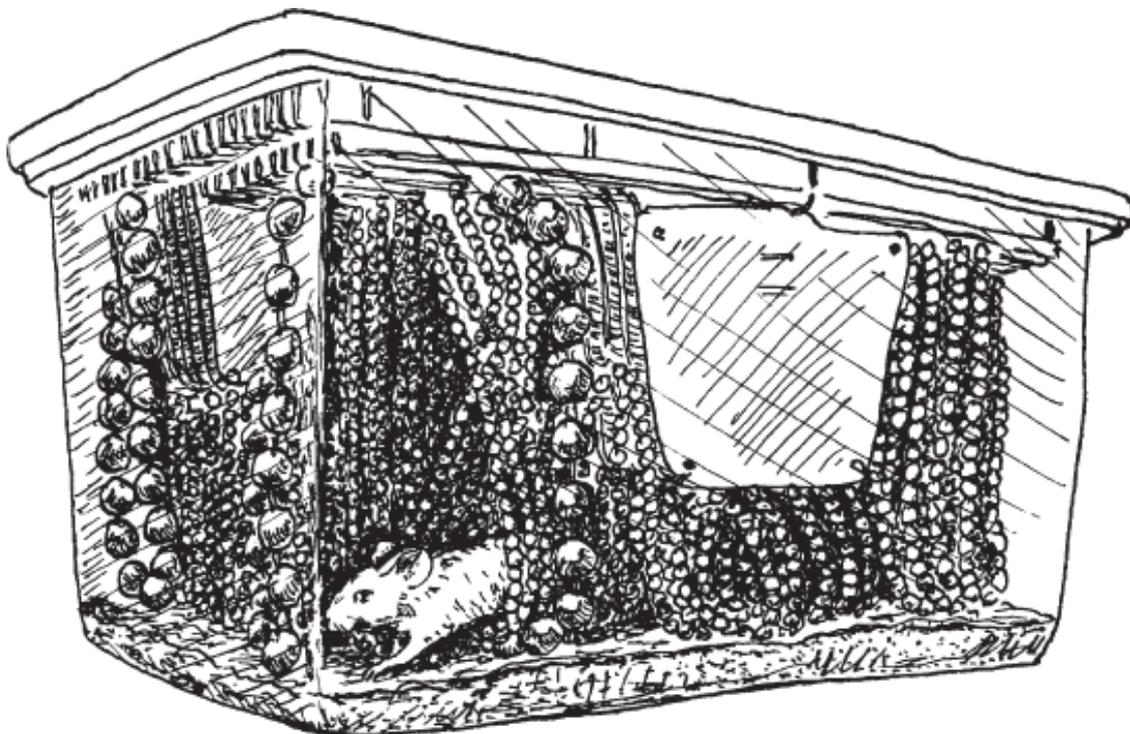
Разрешение у всех этих методов, конечно, меньше, чем у воткнутых прямо в мозг электродов. Работу отдельных нейронов по томограммам проследить нельзя, да и приток крови к активным участкам мозга происходит не мгновенно. Тем не менее компьютерная томография – превосходный инструмент для выяснения вопроса о том, какие участки мозга задействованы в тех или иных видах психической активности.

Воспоминания можно увидеть под микроскопом

При формировании памяти новые отростки и синапсы отрастают не только аксонами, но и дендритами. Именно непрерывное отращивание дендритами новых маленьких отросточков – дендритных шипиков – играет ключевую роль в обучении у млекопитающих. Шипики образуют синаптические контакты с другими нейронами и служат для приема сигналов. Наряду с отращиванием новых шипиков постоянно происходит исчезновение старых. Это, очевидно, приводит к полному или частичному забыванию результатов прежнего обучения. Таким образом, нейрон может «подключаться» к тем или иным своим соседям и отсоединяться от них, усиливать и ослаблять силу контакта с ними (то есть придавать больший или меньший «вес» получаемым от них сигналам).

Мозг млекопитающих сочетает в себе две способности, которые, казалось бы, противоречат друг другу: постоянно усваивать новые знания (например, в виде приобретаемых условных рефлексов) и одновременно сохранять часть приобретенных знаний до самой смерти. Как удастся мозгу совмещать высокую пластичность межнейронных связей со стабильным хранением воспоминаний?

Разобраться в этом помогли, как обычно, новые приборы и методики. Нейробиологи из медицинского центра Нью-Йоркского университета использовали в своих опытах генномодифицированных мышей, у которых некоторые нейроны коры головного мозга (а именно пирамидальные нейроны¹⁸ слоя V коры больших полушарий) производят желтый флуоресцирующий белок (*Yang et al., 2009*). Это позволяет наблюдать за ростом и отмиранием дендритных шипиков прямо у живых мышей сквозь череп при помощи двухфотонного лазерного микроскопа.



¹⁸ Пирамидальные нейроны – особый тип нейронов, которых очень много в коре головного мозга млекопитающих. Отличаются пирамидальной формой «тела» и наличием двух групп дендритов – базальной и апикальной. По-видимому, именно пирамидальные нейроны отвечают за самые сложные мыслительные процессы и высшие когнитивные функции.

В такой обстановке у мышей новые впечатления активнее всего записываются в тех отделах коры, которые обрабатывают тактильную информацию, приходящую от усов (вибрисс).

В первом эксперименте мышей в течение двух дней обучали бегать по быстро вращающемуся цилиндру – трюк, требующий определенного навыка. За эти два дня у мышей в нейронах участка моторной коры, отвечающего за движение передних лап, образовалось на 5–7 % больше новых шипиков, чем у контрольных мышей, которые ничему не обучались. Кроме того, оказалось, что при продолжении однообразных тренировок образование новых шипиков замедляется (поскольку зверек уже научился этому трюку), но снова активизируется, если начать учить мышей чему-то другому (например, бежать по тому же цилиндру задом наперед). Это означает, что образование шипиков связано именно с обучением, а не просто с физическими упражнениями.

Во втором эксперименте вместо бега по крутящемуся цилиндру мышам нужно было научиться жить (и находить пищу и воду) в помещении, заполненном свисающими с потолка гирляндами из шариков. На этот раз новые шипики образовывались в основном в том отделе коры, который получает информацию от вибрисс (чувствительных усиков).

У мышей с обстриженными усами дендриты этого отдела мозга не отращивали новых шипиков. Рост дендритных шипиков замедлялся после двух дней жизни в необычной обстановке, но снова активизировался при пересадке мыши в помещение с другими гирляндами.

После этого ученые проследили, как происходит утрата новоприобретенных шипиков после прекращения тренировок (что соответствует постепенному забыванию полученных уроков). Оказалось, что более 75 % новых шипиков, отросших в ходе двухдневного обучения, утрачиваются в течение следующих двух недель. Гораздо медленнее происходит утрата шипиков, приобретенных в ходе более длительного (4-14-дневного) обучения.

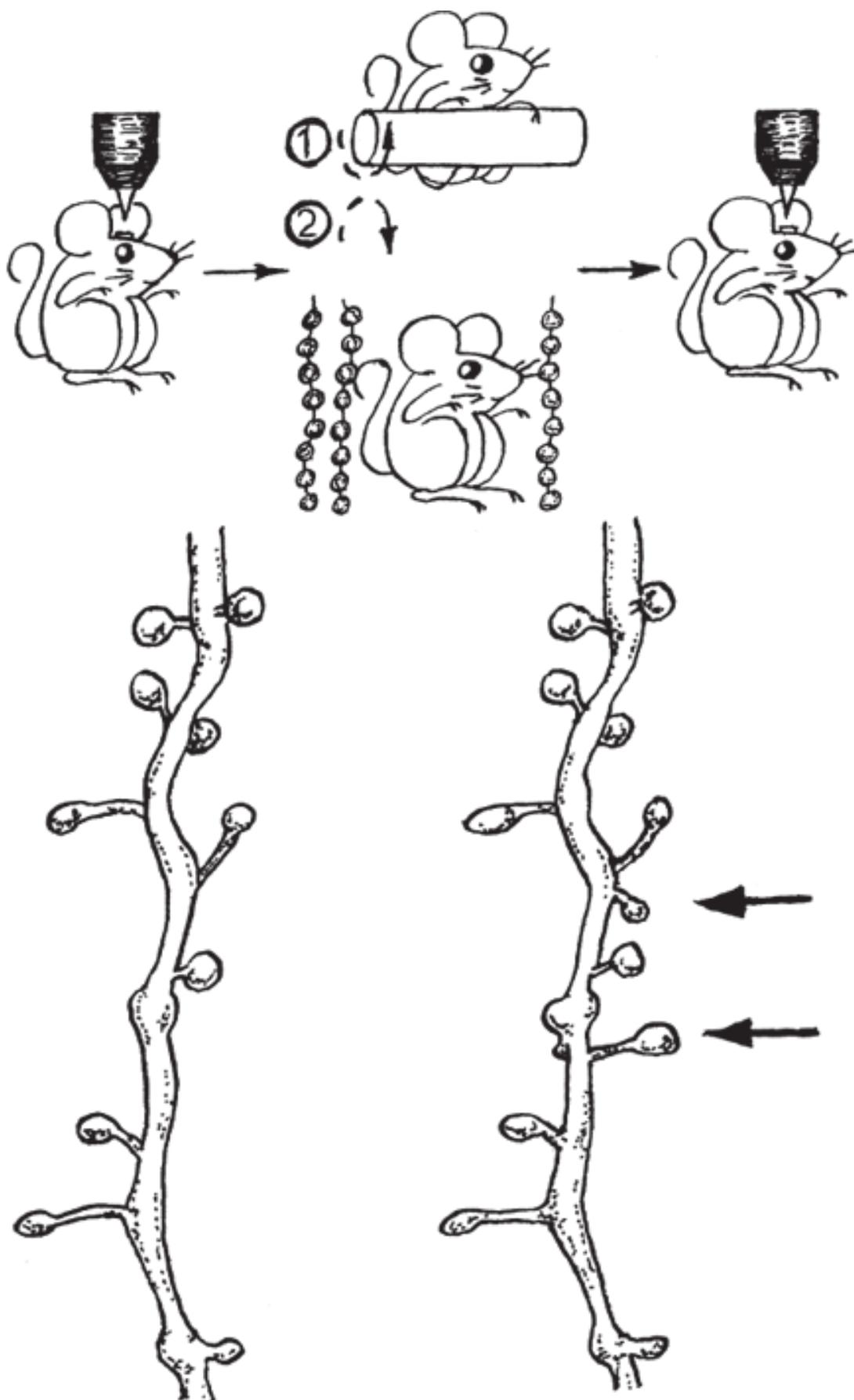


Схема эксперимента (вверху), формирование новых шипиков на отдельном участке одного из дендритов в результате обучения (внизу). Стрелками показаны два дендритных шипика, выросшие за два дня обучения бегу на крутящемся цилиндре. По рисунку из Yang et al., 2009.

Естественно предположить, что те шипики, которые сохраняются надолго, отвечают за долговременное сохранение приобретенных навыков. Экспериментаторы проверили это, сопоставив число сохранившихся шипиков со степенью сохранности двигательных навыков через 1–2 недели после окончания тренировок. Результаты полностью подтвердили теоретические ожидания: те мыши, у которых сохранилось больше новоприобретенных шипиков, лучше сохранили и свои двигательные навыки (сохранность двигательных навыков оценивали по скорости, с которой мышь может бежать по крутящемуся барабану, не падая с него).

Авторы также обнаружили, что различные виды длительного (7–14-дневного) обучения приводят к ускоренной утрате дендритных шипиков, приобретенных ранее в течение жизни, в том числе во время предыдущего обучения чему-то другому. Новые навыки и воспоминания постепенно «затирают» старые – но, по-видимому, не до конца. Эффективность усвоения новых навыков положительно коррелирует с числом утраченных старых шипиков.

Новоприобретенные шипики делятся на три группы: первая, самая многочисленная, исчезает в первые дни после окончания тренировок; вторая, меньшая, сохраняется в среднем 1–2 месяца. Но есть и третья группа шипиков (около 0,8 % от общего числа), которая сохраняется на всю жизнь. Авторы рассчитали, что двухдневное обучение бегу на вращающемся цилиндре приводит к формированию около двух миллионов межнейронных контактов, сохраняющихся до самой смерти животного. Очевидно, этого вполне достаточно для сохранения двигательного навыка. До сих пор никто не знал, каким образом осуществляется пожизненное хранение воспоминаний: то ли они «записаны» раз и навсегда в одних и тех же межнейронных контактах, то ли сохраняются динамическим образом, постепенно «переписываясь» из одних синапсов в другие. Полученные результаты – аргумент в пользу первого из двух вариантов.

То, что авторам удалось показать пожизненное сохранение части дендритных шипиков, приобретенных в ходе обучения, является самым важным результатом их работы. Ранее уже было известно, что система межнейронных связей чрезвычайно пластична и постоянно перестраивается. При этом оставалось неясным, какова материальная природа пожизненного сохранения воспоминаний.

Авторы также рассчитали, что из всех дендритных шипиков, имеющихся у мыши на 30-й день после рождения, до конца жизни сохраняется примерно 30–40 %. Есть основания полагать, что закономерности, обнаруженные у пирамидальных нейронов слоя V, являются общими для большинства нейронов коры.

Это исследование заставляет задуматься о многом. Позволит ли дальнейшее развитие подобных технологий когда-нибудь разработать устройство для считывания знаний из мозга – например, умершего человека? Похоже на то, что ничего принципиально невозможного в этом нет. Конечно, необходимо учитывать, что информация в мозге закодирована не только в количестве синапсов, связывающих одни нейроны с другими, но и в их качестве, поскольку проводимость у разных синапсов разная и тоже может меняться в процессе обучения.

...и считать с томограммы

19

Чтение мыслей всегда считалось чудом, и кто из нас не мечтал об этой способности, обещающей сверхмогущество! Нейробиологи в очередной раз доказали способность науки творить чудеса, наглядно продемонстрировав принципиальную возможность чтения мыслей. Эта возможность уже показана несколькими научными коллективами в разных экспериментах.

Команда английских ученых под руководством Элеонор Магьюр из Института неврологии Университетского колледжа в Лондоне готовила свой эксперимент по чтению мыслей долго и поэтапно. Эксперимент осуществлялся по следующей схеме. Десяти испытуемым показывали три коротких видеосюжета по семь секунд. В видеосюжетах актриса выполняла некие простые действия – опускала письмо в почтовый ящик, выбрасывала в урну жестянку из-под кока-колы и т. д. Участники смотрели клипы по десять раз, затем вспоминали один из сюжетов – либо по своему выбору, либо по указанию экспериментаторов. Во всех случаях снимались показания томографа, сканирующего область гиппокампа и прилегающих структур. После этого оставалось обобщить данные сканирования мозга при воспоминаниях каждого из трех клипов и понять, можно ли по этим результатам определить, какой из трех клипов выбирал испытуемый. Поскольку результат эксперимента статистический, каждый участник должен был вспоминать каждый из клипов семь раз по требованию и десять раз в свободном режиме (*Chadwick et al., 2010*).

Выполнение этого эксперимента помимо аккуратного подбора участников и психологически продуманного дизайна (сколько секунд длится представление задания, в какой момент испытуемый закрывает и открывает глаза и т. д.) требовало решения более сложных технических задач. Во-первых, какую часть мозга сканировать? Во-вторых, как осуществлять обсчет полученных объемных изображений? Современная аппаратура не достигает той разрешающей способности, которая позволила бы отследить работу каждого отдельного нейрона даже в ограниченной области мозга (этого можно добиться, только вставляя в нейроны электроды, но такие опыты на людях не проводят). Какой масштаб осреднения допустим для цифровой обработки томограмм?

Все эти задачи группа Элеонор Магьюр решала, судя по публикациям, не меньше четырех-пяти лет. За это время ученым удалось доказать локализацию пространственной памяти в области гиппокампа. В частности, они провели замечательное исследование с участием настоящих экспертов в области пространственного ориентирования – лицензированных лондонских таксистов (*Woollett et al., 2009*). Эта профессия требует запоминания взаиморасположения не менее 20 000 улиц Лондона. Выяснилось, что у лондонских таксистов увеличены объем и масса серого вещества в задней части гиппокампа.

Множество подобных «наработок», а на самом деле – замечательных самоценных исследований вошли составными частями в эксперимент по угадыванию мыслей. Усредненные томограммы для каждого из трех видеоклипов позволили авторам научиться определять, какое из воспоминаний выбрал тот или иной участник. Точность определения составила 45 %, а это существенно выше, чем 33 %, которые бы получились при случайном попадании.

Аналогичным образом другие исследователи недавно научились определять по томограмме, какое существительное (из 60 возможных) задумал испытуемый. Десяти участникам эксперимента читали вслух 60 существительных, снимая синхронные томограммы. Из

¹⁹ Раздел написан Еленой Наймарк.

индивидуальных томограмм удалось выделить общие компоненты, которые соответствовали каждому из слов. Когда картотека была составлена, участники эксперимента загадывали слово из списка, а ученые, как и в других подобных исследованиях, пытались его определить. Ученым удалось правильно определить задуманные слова в 72 % случаев.

Столь высокая точность была достигнута не за счет большего разрешения томограмм, как можно было бы предположить. По ходу экспериментов ученые разгадали принцип «записи» слов в мозге. Оказалось, что в коре имеются участки, в которых представляются глобальные смысловые ассоциации. Таких ассоциативных групп было найдено три. Первая группа отражает связь с домом или укрытием: крыша, тепло, строение и так далее. Вторая группа связана с едой: яблоко, зуб, ложка. Третья – это предметы, которыми можно манипулировать, совершать какие-то действия: молоток, отвертка, автомобиль. Каждая из трех смысловых групп представлена в мозге набором из нескольких участков, которые возбуждаются, когда человек думает о данном круге понятий. Эти наборы участков – своего рода камеры хранения смыслового багажа, который несет каждое слово, и таких камер хранения три. Мысль об «укрытии» соответствует возбуждению нескольких участков теменных и височных долей, за «еду» отвечают лобные доли, за «манипуляции» – в основном теменные (включая, что любопытно, и те участки надкраевой извилины, которые контролируют реальные манипуляции с объектами, такие как изготовление каменных орудий; см. ниже в этой главе). Кроме того, по реакции некоторых участков затылочных долей можно определить длину слова.

Возбуждение нейронов в центрах только одного представительства указывает, что слово относится только к одной смысловой группе, то есть весь смысловой багаж размещен в одной камере хранения. Например, «дом» – это укрытие, но не еда и не орудие. Если слово ассоциируется сразу с двумя смысловыми группами (как, например, ложка – орудие, связанное с едой, или автомобиль – отчасти орудие, но при этом и укрытие), то возбуждаются нейроны сразу в двух представительствах, смысловая нагрузка расположена в двух камерах хранения. Таким образом, соотношение возбуждений в каждом из трех представительств – количество багажа в каждой из трех камер хранения – формирует конкретное понятие. Остается для каждого слова определить количество багажа в трех камерах хранения, и смысл слова становится ясен. Разгадав этот принцип, экспериментаторы научились не только определять, какое слово задумал человек, но и предсказывать, какие участки коры возбуждятся при мысли о новом, еще не испытанном слове (*Just et al., 2009*).

Еще легче, чем слова, «считываются» с томограммы мозга зрительные образы, например, геометрические фигуры. Не исключено, что в совсем уже недалеком будущем можно будет просматривать сны на экране компьютера. Ложитесь спать в шлеме, а утром достаете из дисковода DVD-диск со всеми увиденными за ночь сновидениями. Представляете, как удобно: вместо того чтобы пересказывать сон своими словами (согласитесь, многие сны в пересказе как-то блекнут), можно будет просто выложить его в YouTube²⁰.

²⁰ Подробнее об исследованиях, связанных с чтением мыслей, рассказано в статье Елены Наймарк «Увидеть мысль». http://www.nm1925.ru/Archive/Journal6_2010_11/Content/Publication6_205/Default.aspx

Память закрепляется во сне

Аплизия, как и многие другие беспозвоночные животные с небольшим числом нейронов, примитивными органами чувств и ограниченными способностями к обучению, получает из внешнего мира сравнительно мало информации. Логические схемы, образуемые сетью межнейронных связей и служащие для анализа этой информации, у нее тоже сравнительно просты. Просты и модели реальности, производимые нервной системой аплизии, – паттерны возбуждения нейронов, возникающие в ответ на те или иные стимулы. В такой ситуации процесс запоминания можно, по-видимому, пустить на самотек, то есть обойтись без специализированных нейронных контуров, руководящих этим процессом. У животных с большим мозгом, таких как млекопитающие, дело обстоит иначе. Поступающей информации слишком много, модели реальности слишком сложны, динамичны, разнообразны и многочисленны. Чтобы запомнить абсолютно все, что видел, слышал, почувствовал, пережил, не хватит никаких мозгов. Нужно выбирать. Нужно отправлять на постоянное хранение только самую важную информацию. Поэтому у высших животных в процессе эволюции развиваются специализированные отделы мозга, берущие на себя функцию сортировки полученной информации, отделения зерен от плевел и записывания отобранных, разложенных по полочкам сведений в долговременную память.

Долговременная память у высших животных делится на сознательную (эксплицитную, или *декларативную*) память о событиях, фактах, ощущениях и бессознательную, имплицитную, или *процедурную*, память (например, о двигательных навыках). Процедурная память хранится в моторной коре²¹ и мозжечке. В ее формировании участвуют такие отделы мозга, как стриатум, или полосатое тело, и миндалина (миндалевидное тело). Декларативная память локализуется в тех отделах коры, которые отвечают за восприятие соответствующих сигналов, – например, память об увиденном хранится в зрительной коре. Ключевым отделом мозга, необходимым для запечатления приобретенного опыта в виде долговременной декларативной памяти, является гиппокамп.

Роль гиппокампа в формировании декларативной памяти была открыта Брендой Милнер и ее коллегами в 1950–1960-х годах в ходе исследования пациента, которому удалили гиппокамп, чтобы вылечить от тяжелой эпилепсии. Ожидаемый терапевтический эффект был достигнут, однако несчастный пациент полностью утратил способность что-либо запоминать. Он прекрасно помнил всю свою жизнь до операции, сохранил здравый рассудок и способность поддерживать разумную беседу (только без перескакивания с одной темы на другую), однако все события, происходившие с ним после операции, задерживались в его памяти лишь на несколько минут, а потом безвозвратно забывались. При этом способность к формированию долговременной бессознательной (процедурной) памяти у него сохранилась. Например, он мог вырабатывать новые двигательные навыки в результате тренировки, хотя самих тренировок не помнил.

В последнее время внимание ученых все более привлекает связь памяти и сна. Установлено, что во сне происходит закрепление обоих типов долговременной памяти, причем декларативная память закрепляется в фазе медленного сна, а процедурная – в фазе быстрого сна (так называемого REM-сна, от слов *rapid eye movement* – «быстрое движение глаз»).

В опытах на крысах было показано, что во время медленного сна в гиппокампе возбуждаются те же группы нейронов и в той же последовательности, что и в процессе обучения, проводившегося накануне. Это навело ученых на мысль, что гиппокамп во сне многократно

²¹ *Моторная кора* – часть коры головного мозга, отвечающая за планирование и осуществление произвольных движений. Моторная кора тянется полосой вдоль заднего края лобных долей, там, где они граничат с теменными долями.

«прокручивает» полученную днем информацию, что, вероятно, способствует ее лучшему запоминанию – «протаптыванию дорожек» в нейронных сетях.

Однако активная роль гиппокампа в процессе закрепления памяти во сне не является окончательно доказанной. Существует альтернативная гипотеза, согласно которой медленный сон способствует закреплению декларативной памяти просто потому, что это самая глубокая фаза сна, во время которой мозговая активность снижается до минимума, причем отношение «осмысленных» (важных, сильных) сигналов к различным «шумам» становится максимальным.

Чтобы получить некоторое представление о том, какими методами нейробиологи решают подобные вопросы, рассмотрим один остроумный эксперимент, при помощи которого германским ученым недавно удалось получить новые свидетельства в пользу того, что запоминание во время медленного сна – процесс активный, требующий работы гиппокампа (*Rasch et al., 2007*).

Эксперимент проводился на добровольцах, которых усаживали за компьютер и предлагали поиграть в игру на запоминание. Игра состоит в следующем. На экране компьютера изображены 30 карточек рубашкой кверху (карточки расположены пятью рядами по шесть штук в каждом). Электронная колода состоит из 15 пар карточек, различающихся рисунком на лицевой стороне. Одна из карт переворачивается, так что испытуемый может видеть рисунок. Через секунду переворачивается вторая карта с тем же рисунком. Испытуемый должен запомнить их расположение. Через три секунды обе карты снова переворачиваются рисунком вниз, а еще через три секунды производится точно такая же демонстрация следующей пары карточек. После того как все 15 пар карточек показаны по два раза, начинается проверка памяти. Открывается одна из карт, а испытуемый должен при помощи мыши указать, где находится парная. Вне зависимости от правильности ответа парная карта открывается на три секунды, так что обучение продолжается и во время тестирования. Все это длится до тех пор, пока испытуемый не выучит расположение десяти пар из 15.

В процессе обучения испытуемые обоняли аромат розы, который подавался им через специальную носовую маску. После этого добровольцы отправлялись спать как были, в масках, да еще и с электродами на голове для снятия электроэнцефалограммы. Неудивительно, что для эксперимента отбирались здоровые молодые люди, некурящие, непьющие и не имеющие проблем со сном.

Как только энцефалограмма показывала, что началась фаза медленного сна, половине испытуемых подавали через маску аромат розы, а другой половине – нет. Утром проверяли, кто лучше запомнил расположение карточек. Оказалось, что первая группа испытуемых усваивала материал гораздо лучше. Кроме того, при помощи магнитно-резонансной томографии удалось показать, что обонятельный стимул, поступающий во время медленного сна, активизирует нейроны гиппокампа.

Исследователи поставили также три контрольных эксперимента. В первом из них во время обучения запах не подавался, а во сне подавался так же, как и в основном опыте. Никакого улучшения запоминания зарегистрировано не было. Это означает, что запах розы способствует закреплению навыков не сам по себе, а только как стимул, ассоциативно связанный с процессом обучения. Во втором контрольном эксперименте запах подавали во время обучения и во время фазы быстрого сна. В этом случае обонятельный стимул тоже никак не повлиял на запоминание. Это подтверждает прежние результаты, согласно которым именно фаза медленного сна является ключевой для закрепления осознанных «декларативных» воспоминаний. Наконец, в третьем контрольном эксперименте запах подавали во время обучения, а затем еще раз во время бодрствования (перед сном). Это тоже не повлияло на результаты утренней проверки.

Полученные результаты подтверждают гипотезу, согласно которой закрепление осознанных воспоминаний (декларативной памяти) во время медленного сна – это активный процесс, идущий при участии гиппокампа. Обонятельные стимулы, ассоциирующиеся с усвоенными накануне знаниями, дополнительно стимулируют гиппокамп, который от этого, вероятно, начинает активнее «прокручивать» те последовательности нервных импульсов, которые возникали в нем накануне в процессе обучения (как было показано ранее на крысах).

А что же имплицитная, или процедурная, память? Ученые провели точно такую же серию экспериментов с применением другого вида обучения, ориентированного именно на этот вид памяти – на формирование моторных навыков. Вместо игры с карточками испытуемых просили как можно более быстро и точно раз за разом набирать на клавиатуре определенную последовательность из пяти символов. Наутро все испытуемые показывали в этом тесте результаты лучшие, чем накануне вечером, то есть приобретенные моторные навыки за ночь каким-то образом закреплялись. Однако никакие игры с запахами не влияли на это закрепление, в том числе и тогда, когда запах подавался во время фазы быстрого сна.

Этот результат может показаться странным, поскольку известно, что моторные навыки закрепляются как раз во время этой фазы. По мнению авторов, дело тут в том, что обонятельные стимулы не могут так же легко вступать в ассоциативную связь с «моторными» (процедурными) воспоминаниями, как с декларативными. Действительно, те отделы мозга, где обрабатывается обонятельная информация, весьма тесно связаны с гиппокампом. Это известно из анатомии мозга и подтверждается тем, что запахи, ассоциативно связанные с важными событиями в жизни человека, являются мощным средством для пробуждения осознанных воспоминаний. Что же касается связи обонятельных отделов мозга со стриатумом, моторной корой и мозжечком (отделами, ответственными за процедурную память), то она, по всей видимости, является значительно более опосредованной.

В данном исследовании использовались обонятельные стимулы (а не зрительные, слуховые или тактильные) просто потому, что от них человек не просыпается. Но полученные результаты заставляют задуматься, почему обоняние – казалось бы, наименее важное из наших пяти чувств – оказалось так тесно связано с самыми глубинными и сложными процессами, происходящими в нашем мозге. Очевидно, это наследие тех времен, когда у далеких предков человека обоняние играло гораздо более важную роль, чем сегодня.

Потеря памяти не ведет к утрате «теории ума»

«Теория ума» считается одной из основных отличительных черт человеческого мышления. В какой-то степени этой способностью обладают и другие животные – обезьяны, слоны, дельфины, врановые птицы (см. главу «В поисках душевной грани»), – но люди, по всей видимости, превосходят их по точности и глубине понимания чужих мыслей, чувств, целей и намерений.

«Теория ума» тесно связана с самосознанием, в ее основе лежит умение судить о других «по себе». Поэтому психологи считали само собой разумеющимся, что для понимания чужих мыслей абсолютно необходима так называемая *эпизодическая* память, то есть память о собственных мыслях, переживаниях и событиях личной жизни.

Мы уже знаем, что долговременная память делится на декларативную (сознательную, эксплицитную – память о фактах и событиях) и процедурную (бессознательную, имплицитную – например, память о двигательных навыках). Декларативная память в свою очередь делится на семантическую

и эпизодическую. *Семантическая* память – это абстрактные, безличные знания об объектах, событиях, фактах и связях между ними, никак не связанные с личным опытом. *Эпизодическая* память, напротив, хранит информацию о событиях личной жизни, о собственных переживаниях и мыслях.

Так вот, считалось, что именно эпизодическая память теснее всего связана с «теорией ума», что без личных воспоминаний невозможно понять мысли и мотивацию поступков других людей.

Для проверки подобных идей огромную ценность представляют люди, которые в результате травмы или болезни утратили выборочно те или иные психические функции. Мы уже упоминали о пациенте, который вместе с гиппокампом утратил способность к формированию декларативных (но не процедурных) воспоминаний. Изучение этого пациента обеспечило прорыв в понимании механизмов памяти.

Недавно в руки канадских психологов попали сразу два уникальных пациента, у которых в результате черепно-мозговой травмы произошли психические изменения еще более редкого и избирательного свойства (*Rosenbaum et al., 2007*). Оба мужчины (К. С. и М. Л.) стали объектами пристального внимания ученых из-за дорожной аварии (один был мотоциклистом, другой велосипедистом). У обоих от сильного удара головой полностью отшибло *эпизодическую память*. При этом большинство других психических функций осталось в пределах нормы. Пациенты сохранили нормальный уровень интеллекта (IQ = 102 и 108). При них остались все те знания, которые они успели получить до травмы (то есть семантическая память не пострадала). Правда, способность приобретать новые знания они в значительной степени утратили из-за повреждений гиппокампа и других отделов мозга. Но все личные воспоминания стерлись напрочь. Пациенты не могут вспомнить ни одного эпизода из своей жизни – ни до травмы, ни после.

Исследователи, наблюдавшие пациентов, были удивлены тем обстоятельством, что в общении эти люди казались совершенно нормальными, вплоть до того, что у К. С. даже сохранилось тонкое чувство юмора. А ведь без теории ума, то есть без понимания мыслей и чувств других людей, нормальное общение и юмор едва ли возможны. Это и навело ученых на мысль, что у них есть уникальный шанс опровергнуть гипотезу о неразрывной связи теории ума с эпизодической памятью.

Пациентам предложили пройти серию стандартных тестов, специально разработанных для выявления дефектов «теории ума». Те же задания были предложены контрольной группе из 14 здоровых людей, близких по уровню образования и социальному статусу к двум исследуемым мужчинам.

В частности, там были тесты, в которых испытуемый должен был понять, что другой человек не знает чего-то, что самому испытуемому известно, или разобраться в поведении двух людей, один из которых имеет ошибочное представление о том, что думает или знает другой. В других тестах нужно было понять, нанес ли один человек другому преднамеренную обиду в той или иной ситуации, и объяснить, почему не следовало так поступать и что именно чувствовал обиженный. Были также тесты на способность понимать чужие эмоции по выражению лица. Подобные тесты применяют при диагностике различных форм аутизма

(люди, страдающие аутизмом, имеют ослабленную «теорию ума» и обычно не справляются с такими заданиями).

Оба пациента справились со всеми тестами ничуть не хуже здоровых людей. Авторы сделали из этого справедливый вывод, что эпизодическая память не является обязательным условием *наличия* у человека нормальной «теории ума». По-видимому, для этого вполне достаточно одной лишь абстрактной семантической памяти. Впрочем, полученный результат не доказывает, что эпизодическая память не нужна для *формирования* теории ума. Очевидно, что умение понимать чужие мысли и поступки сформировалось у пациентов еще до травмы, когда с эпизодической памятью у них все было в порядке. И все же это исследование заставляет задуматься о том, насколько глубоко «вмонтированы» в структуру человеческого мозга такие высшие социально ориентированные способности, как «теория ума».

Речной рак принимает решение

В нейробиологии успех исследований самым радикальным образом зависит от удачного выбора объекта. Эрик Кандель, получивший в 2000 году Нобелевскую премию за исследования памяти, рассказывает в своих мемуарах²², что поворотным пунктом в его карьере стало решение сменить объект. Тайны памяти, ускользавшие от исследователей, пока они работали на кошках, удалось раскрыть в ходе изучения морского моллюска аплизии. Не в последнюю очередь этому способствовало то обстоятельство, что нейроны аплизии гораздо крупнее кошачьих. Это позволяет следить за работой индивидуальных нервных клеток – например, втыкая в них электроды и регистрируя электрическую активность. Результаты, полученные на аплизии, впоследствии оказались вполне приложимыми и к кошкам, и к людям.

Механизмы принятия решений изучают обычно на млекопитающих – животных с чрезвычайно сложной нервной системой и мозгом, состоящим из сотен миллионов очень мелких нейронов. Даже самые мощные современные методы, такие как магнитно-резонансная томография, позволяют в лучшем случае найти участки мозга или большие группы нейронов, участвующие в тех или иных этапах принятия решения в неоднозначной ситуации (*Gold, Shadlen, 2007*). Чтобы добраться до более тонких деталей, нужен объект попроще, и желательно с крупными нейронами. Впрочем, сначала нужно убедиться, что такие животные действительно способны принимать «осмысленные» (то есть целесообразные, адаптивные) решения на основе комплексного анализа разнородной информации, подобно тому как это делают умные млекопитающие.

Мы уже знаем, что даже отдельно взятый нейрон – базовый элементарный блок нервной системы – по сути дела является маленькой биологической машинкой для принятия одного из двух альтернативных решений (возбудиться или нет) на основе анализа разнородных входящих сигналов. Понятно, что из нескольких таких блоков в принципе нетрудно сконструировать более сложный контур, обеспечивающий осмысленное поведение организма. Но это теория, а как обстоит дело на практике?

Результаты экспериментов на раках, проведенных недавно психологами и нейробиологами из Мэрилендского университета (США), показали, что сравнительно простая нервная система рака эффективно справляется с задачами, требующими принятия решений (то есть осмысленного, целесообразного выбора одного из нескольких альтернативных вариантов поведения в зависимости от ситуации) (*Liden et al., 2010*).

В ряде работ, выполненных в последние годы, было показано, что раки могут стать перспективным объектом для нейробиологических исследований. Поэтому интерес ученых к этим животным вполне понятен. Одно из самых удобных свойств раков заключается в том, что в осуществлении некоторых важных поведенческих реакций у них участвуют немногочисленные очень крупные нейроны, электрическую активность которых можно регистрировать неинвазивными методами – помещая электроды просто в воду рядом с раком и ничего не втыкая в само животное.

Авторы исследовали реакцию молодых раков *Procambarus clarkii* на движущиеся тени (см. рисунок). В опытах приняли участие 259 раков. Чтобы исключить эффекты обучения и привыкания, каждого рака использовали только в одном опыте.

²² В январе 2011 года, когда я пишу эти строки, великолепная книга Канделя «В поисках памяти» уже переведена на русский язык и готовится к печати.

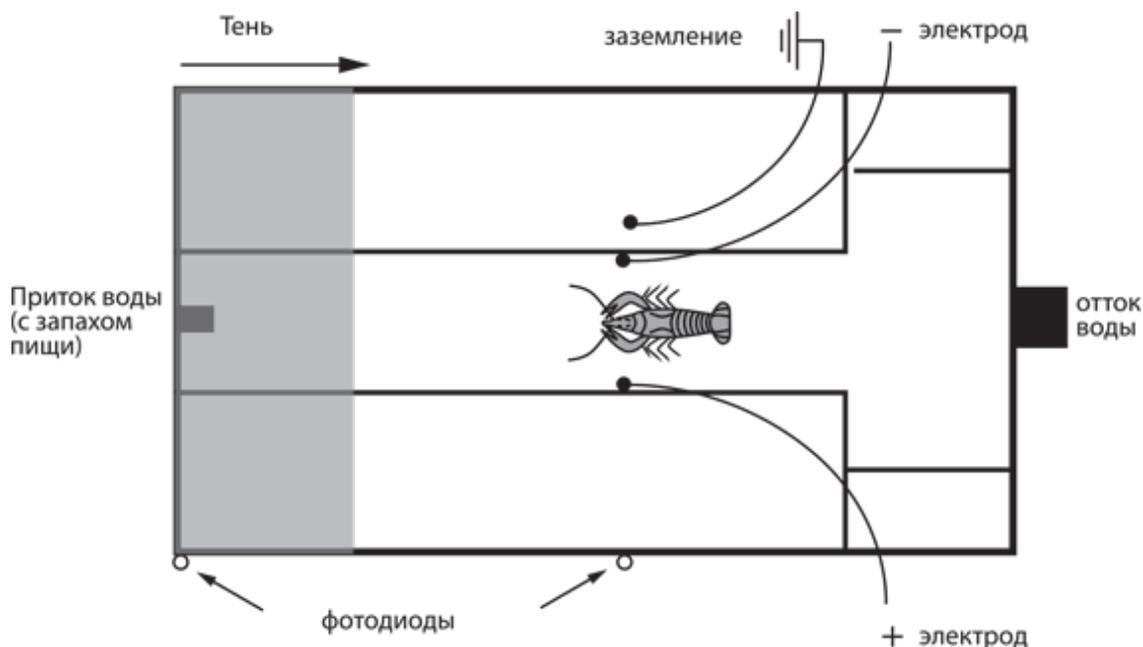
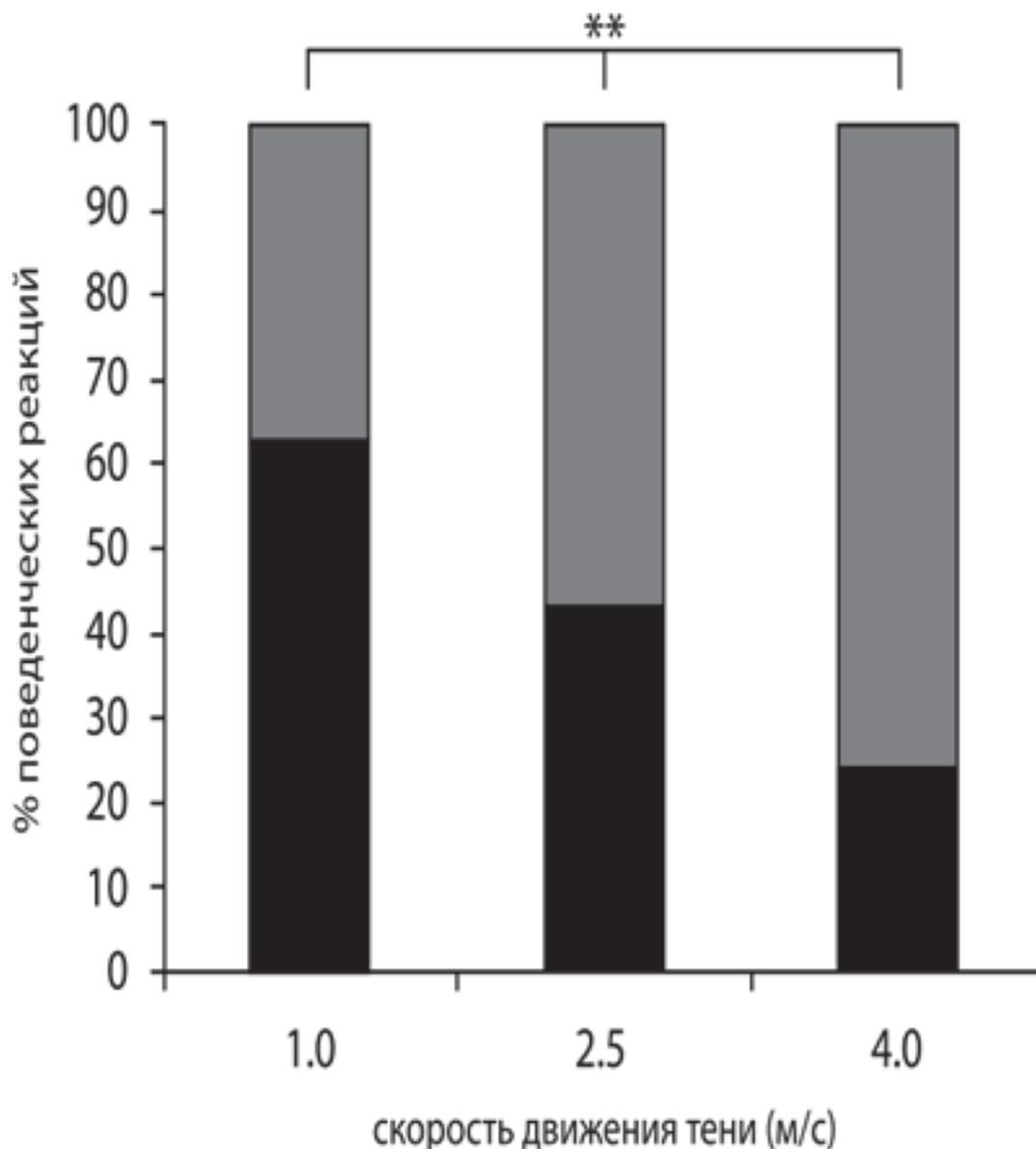


Схема экспериментальной установки. Проголодавшегося рака выпускали в правую часть аквариума, после чего он шел влево, на запах пищи. Когда рак достигал первого фотодиода, на него начинала надвигаться тень. При помощи электродов регистрировали активность медиальных гигантских нейронов. По рисунку из Liden et al., 2010.

Заметив приближающуюся тень, рак либо замирает, либо резко бьет хвостом и отпрыгивает далеко назад. Обе реакции – защитные. В природе движущаяся тень с большой вероятностью означает приближение хищника – например, крупной рыбы или птицы. В эксперименте использовали тень от пластиковой непрозрачной пластины, и раки никогда не игнорировали ее. В каждом опыте непременно наблюдалась одна из двух реакций – либо замирание, либо удар хвостом.

Ранее было установлено, что удар хвостом происходит в результате возбуждения двух гигантских нейронов, расположенных в брюшной нервной цепочке и проходящих вдоль всего тела рака (*medial giant interneurons, MG*). Возбуждение этих нейронов регистрировалось при помощи двух электродов. Электрический импульс пробегает по гигантским нейронам примерно за одну миллисекунду до того, как начнут сокращаться мышцы брюшка.

То есть фактически приборы регистрируют принятое раком решение ударить хвостом еще до самого удара. Что касается реакции замирания, то она провоцируется возбуждением одного-единственного нейрона; этот нейрон известен, но в данном эксперименте его активность не регистрировалась.



Решение рака зависит от скорости движения тени. По горизонтальной оси – скорость тени (м / с), по вертикальной – процент принятых решений; серым цветом показаны замирания, черным – удары хвостом. По рисунку из Liden et al., 2010.

Оказалось, что рак решает, как ему поступить – замереть или ударить хвостом, – в зависимости от скорости движения тени. Если тень надвигается медленно (1 м/с), то рак, скорее всего, прыгнет.

При виде быстрой тени (4 м/с) – замрет. Эти скорости примерно соответствуют реальным скоростям движения хищных рыб.

Смысл такого поведения довольно очевиден. Если хищник движется не очень быстро, есть шанс спастись от него бегством. Это надежнее, чем замирать и надеяться, что тебя не заметят. Но если враг мчится со скоростью 4 м/с, прыгать от него бесполезно – догонит. Остается замереть и положиться на удачу. Похожее поведение характерно для грызунов: они тоже чаще реагируют замиранием, а не бегством, на угрозу, от которой трудно или невозможно убежать.

От скорости тени зависело не только само решение, но и время, затраченное раком на его принятие. Те раки, которые в итоге выбрали прыжок, раздумывали дольше, если тень

надвигалась не очень быстро. Между началом движения тени и возбуждением МГ прошло около 80 мс при скорости тени 1 м/с и лишь около 65 мс при скорости 4 м/с. Впрочем, раки все равно не успевали отпрыгнуть до того, как тень их накроет: при максимальной скорости движения тени она достигала их за 44 мс.

Могут ли раки, принимая решение, учитывать еще какие-то факторы, кроме скорости движения тени? Прыжок обходится раку довольно дорого: помимо того что на столь резкое движение тратится много сил, рак после прыжка оказывается дальше от своей цели – в данном случае от источника вкусного запаха, к которому он полз. Кроме того, после прыжка ему приходится дольше приходить в себя, прежде чем он сможет продолжить путь. Раки начинали снова ползти на запах в среднем через 11 с после реакции замирания и через 29 с после удара хвостом. На то, чтобы добраться до цели, в первом случае уходило в среднем 47 с (от начала эксперимента), а во втором – целых 140 с. В природе раки часто сталкиваются с дефицитом пищи и дерутся за нее друг с другом. Поэтому раку невыгодно шарахаться от каждой тени. Принимают ли раки в расчет это обстоятельство?

Авторы провели еще одну серию экспериментов с переменной концентрацией пищевого запаха и со скоростью движения тени 1 и 2 м/с. Ученые предположили, что более сильный – а значит, более привлекательный – запах пищи, возможно, будет склонять раков к тому, чтобы реже прыгать и чаще замирать. Это предположение подтвердилось: концентрированный запах пищи достоверно снизил частоту прыжков, соответственно повысив частоту замираний. Особенно четко эта закономерность проявилась при скорости тени 2 м/с. При низкой скорости (1 м/с) эффект был сходный, но более слабый.

Исследование показало, что процесс принятия решений у раков в общих чертах похож на таковой у млекопитающих. Раки интегрируют информацию, поступающую от разных органов чувств (в данном случае – от глаз и обонятельных рецепторов), «взвешивают» значимость этих сигналов и принимают решение на основе результатов взвешивания. Сам акт принятия решения состоит в том, что несколько ключевых нейронов, на которых сходятся окончания других нервных клеток, либо возбуждаются, либо нет.

Разумеется, для того чтобы осуществлять подобные аналитические процедуры – и в результате совершать вполне осмысленные, адаптивные поступки, – вовсе не нужно обладать сознанием²³. Даже очень простые нейронные контуры могут справляться с такой работой, совершая ее автоматически, без всякого осознания или рефлексии, подобно интерактивной компьютерной программе. Эта простая мысль до сих пор кажется чуждой многим людям, что вообще-то немного странно в наш компьютерный век. Изученное в обсуждаемой работе поведение раков нетрудно запрограммировать. Наверняка можно сделать искусственного автоматического рака, который будет реагировать на тени и запахи совсем как живой. Подобные роботы уже существуют: например, удалось сделать механических тараканов, которых живые тараканы принимают за «своих» и даже считаются с их «мнением», когда нужно решить, в каком из нескольких укрытий лучше всем вместе спрятаться (тараканы – большие коллективисты) (*Halloy et al.*, 2007).

Вряд ли на раках можно изучать сложные мыслительные процессы, характерные для человека и других млекопитающих, но базовые нейробиологические механизмы принятия решений, по-видимому, сходны у нас и у раков. Изучать их на раках гораздо проще, чем на обезьянах и крысах, что делает раков перспективными объектами нейробиологических исследований.

²³ В одной англоязычной научно-популярной книге – к сожалению, не могу вспомнить, в какой именно, – мне попалась очаровательная (и при этом абсолютно верная) фраза: «Чтобы учиться, не нужно обладать ни разумом, ни сознанием». По-моему, она подошла бы в качестве девиза многим образовательным учреждениям.

Рассмотренный пример также помогает понять, почему результаты мыслительных процедур у людей и других животных часто бывают предельно дискретными (контрастными, категориальными)²⁴. Рак не может наполовину замереть, наполовину прыгнуть. Нужно выбрать одно из двух и затем уже действовать решительно, не оглядываясь на упущенные альтернативные возможности. Кроме того, как мы уже говорили, категоричность изначально заложена в саму структуру нейрона. Нейрон не может послать по аксону половину или семь восьмых потенциала действия. Все или ничего, ноль или единица, белое или черное. Надо ли удивляться, что люди так любят преувеличивать контрастность наблюдаемых различий между похожими объектами, что мы склонны искать (и, черт побери, находить!) четкие границы даже там, где их со всей очевидностью нет. Как, например, в эволюционном ряду, соединяющем нечеловеческих обезьян с человеком.

«Нет, вы все-таки скажите нам точно, в какой момент обезьяна стала человеком!» – вот типичное требование, предъявляемое публикой ученым, когда речь заходит об антропогенезе. Не скажу. Зато вы можете спросить у речного рака, на какие категории делятся хищники. Он вам объяснит, что хищники делятся на две категории, которые невозможно спутать и между которыми вообще нет ничего общего. Есть медленные хищники – от них нужно прыгать. Есть быстрые хищники – от них не убежишь, нужно замирать. Вот и все. Переходных форм не существует. Для такой логики достаточно пары нейронов. Для иной – часто не хватает и ста миллиардов.

²⁴ Соображения, изложенные в этом абзаце, автор позаимствовал у лингвиста С. А. Бурлак, которая высказала их на антропологическом семинаре в Московском Государственном Дарвиновском музее в конце 2010 года.

Электромеханические устройства на мысленном управлении

Поскольку мысли материальны и складываются из комбинаций нервных импульсов, то нет никаких физических запретов на создание разнообразных инженерно-технических «приложений» к мозгу – устройств на мысленном управлении. Собственно, все тело животного представляет собой именно такое устройство. Но нам, конечно, хотелось бы получить более наглядную демонстрацию. Что-нибудь из металла и пластика, пожалуйста. С электромоторчиками и шестеренками – и чтобы мозг всем этим мог напрямую управлять.

Если бы подобные проекты нужны были только для убеждения упертых идеалистов, игра не стоила бы свеч. Но они нужны не только для этого. Разработка протезов, которыми человек мог бы управлять точно так же, как настоящими конечностями, при помощи мозговых импульсов, является одной из актуальных задач медицины. В последнее время в этой области наблюдается значительный прогресс. И люди, и другие обезьяны уже могут – при посредстве несложных электронных устройств – мысленно управлять движением курсора на экране компьютера. Но управлять курсором куда проще, чем пользоваться таким сложным прибором, как рука, в настоящем трехмерном пространстве.

В 2008 году группа американских нейробиологов, медиков и робототехников сообщила о сенсационном результате: им удалось научить двух макак резусов брать пищу и отправлять ее в рот при помощи механической руки с мысленным управлением (*Velliste et al., 2008*).

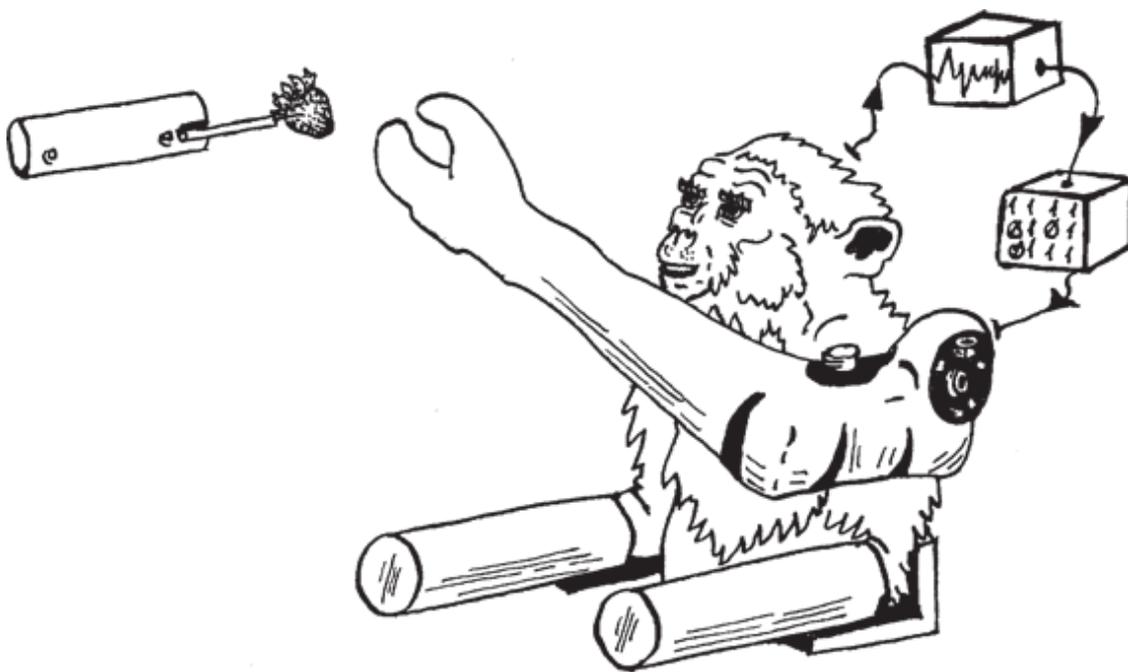


Схема эксперимента. Мозговые импульсы подвергаются компьютерной обработке, и на их основе генерируются сигналы, управляющие движением механической руки. Собственные руки обезьяны зафиксированы в горизонтальных трубках. По рисунку из Velliste et al., 2008.

В экспериментах использовалась искусственная рука, по своим механическим характеристикам близкая к настоящей. У нее пять степеней свободы: она может двигаться в плечевом суставе вверх-вниз, вправо-влево и вращаться вокруг своей оси (три степени свободы), в локтевом суставе она может только сгибаться-разгибаться (четвертая степень свободы);

кроме того, она снабжена хватающей «кистью» в виде клешни, которая может сжиматься и разжиматься (пятая степень свободы). Все движения осуществляются при помощи моторчиков с компьютерным управлением.

Ученые вживили двум макакам по 96 электродов в участок моторной коры, управляющий движениями плеча и предплечья. Эти электроды у двух обезьян были немного по-разному распределены. Попадание электродов в те или иные конкретные точки коры было отчасти случайным, и уж во всяком случае никто не мог знать заранее, какие из электродов будут воспринимать мозговые команды, скажем, о подъеме руки, а какие – о сгибании локтя. Это предстояло выяснить в ходе дальнейших экспериментов. Долгий курс обучения должны были пройти не только обезьяны, но и компьютерная программа, интерпретирующая мозговые сигналы и преобразующая их в команды для управления механической рукой.

На начальном этапе обезьян учили управлять рукой при помощи джойстика с кнопкой (кнопка предназначалась для открывания и закрывания клешни). Кроме того, обезьяна просто смотрела на автоматические движения руки, которая брала пищу из разных мест и подносила ее ко рту подопытной (известно, что вкусная пища – чуть ли не единственный стимул, побуждающий обезьяну в лабораторных условиях быть внимательной и чему-то учиться). Пока механическая рука двигалась, а обезьяна на нее смотрела, компьютер регистрировал сигналы, поступающие от 96 электродов, и подвергал их статистической обработке. Сигналы от некоторых датчиков не коррелировали с движениями руки, и эти датчики впоследствии не учитывались. Для остальных электродов компьютер определял, какие движения искусственной руки сопровождаются наиболее интенсивными (частыми) нервными импульсами. Так были выявлены электроды (и соответствующие точки мозга), которые избирательно реагируют на те или иные движения (вверх-вниз, вперед-назад и вправо-влево), а также на сжатие и разжатие пальцев. Соответствующий «рисунок» возбуждения нейронов интерпретировался как команда, посылаемая мозгом. Например, если данные десяти датчиков регистрировали наиболее сильные сигналы при подъеме руки, то в дальнейшем, когда управление рукой передавали обезьяне, сигналы от этих десяти датчиков компьютер преобразовывал в команду «поднять руку».

После этого этапа предварительного обучения исследователи попытались сразу передать обезьянам всю власть над механической рукой, но ничего не вышло: обезьяны не справились с управлением. Тогда пришлось пойти более долгим путем постепенной передачи контроля от «автопилота» обезьяне. При этом училась не только обезьяна, но и компьютер: интерпретация нервных импульсов постоянно уточнялась и подстраивалась к текущему состоянию обезьяньего мозга. Как выяснилось, такая подстройка должна осуществляться ежедневно, потому что компьютерная интерпретация мозговых сигналов, основанная на вчерашних экспериментах, сегодня может для той же самой обезьяны оказаться недостаточно точной. Кроме того, импульсы, генерируемые мозгом во время пассивного наблюдения за автоматически движущейся рукой, оказались не совсем идентичными тем, что генерируются при непосредственном мысленном управлении искусственной конечностью.

Задача, которую обезьяна должна была выполнить при помощи искусственной руки, изо дня в день была одна и та же: нужно было взять пищу (пастилу или ягоду), которая появлялась в разных местах в пределах досягаемости, и поднести ее ко рту (а потом, разумеется, съесть, но это уже делалось без помощи технических средств). Самая трудная часть задания состояла в том, чтобы поднести раскрытую клешню точно к пище. Для этого нужно управлять рукой с точностью до нескольких миллиметров, иначе еду не удастся схватить. Подносить пищу ко рту можно с меньшей точностью, поскольку обезьяна могла шевелить головой (ее руки – настоящие, а не искусственные – были закреплены в специальных трубках).

В течение нескольких недель контроль над искусственной рукой постепенно передавался от автопилота обезьяне. Помощь автопилота, упрощенно говоря, состояла в том,

что обезьяне было легче совершать «правильные» движения, чем «неправильные», – искусственная рука охотнее двигалась в нужном направлении, чем в любом другом. Постепенно эта помощь слабела. С точки зрения обезьяны это означало, что задача становилась все более трудной, так что ей приходилось каждый день продолжать учиться, постепенно совершенствуя мастерство владения искусственной рукой.

Наконец автопилот был полностью отключен, и обезьяны стали совершенно самостоятельно кормить себя при помощи механической руки, управляемой мозгом. Нельзя сказать, что это получалось у них так же ловко, как настоящими руками, но все же в большинстве случаев им удавалось взять пищу и отправить в рот.

Авторы отмечают, что обезьяны не просто выучили серию механически повторяющихся «ментальных» действий, а освоили настоящее сознательное управление искусственной конечностью. Это подтверждается несколькими фактами. Во-первых, положение пищи все время менялось, так что тянуть искусственную руку нужно было в разные стороны.

Во-вторых, ученые провели дополнительный опыт, в котором пища была внезапно передвинута в тот момент, когда обезьяна уже поднесла к ней свою клешню. Если бы обезьяна теперь направила клешню к лакомству по прямой линии, угощение было бы сбито с подставки. Нужно было переместить конечность по дуговой траектории, и обезьяна отлично с этим справилась.

В-третьих, в ходе экспериментов обезьяны освоили ряд новых движений, которым их никто не учил. Например, если во время поднесения пищи ко рту лакомство падало, обезьяны не продолжали двигать ко рту пустую клешню, а останавливали ее в ожидании следующей порции. Они также научились совершать клешней небольшие движения около рта, чтобы удобнее было ее облизывать, и не тянули руку к новой порции пищи до тех пор, пока не оближут хорошенько. Сначала они держали клешню закрытой в течение всего времени переноса пищи ко рту, но потом заметили, что пастила прилипает к клешне и обычно не падает, даже если клешню разжать. Тогда они стали разжимать клешню не у самого рта, а еще в пути.

Идеи и методы, придуманные авторами, должны помочь медикам и инженерам в разработке протезов с мысленным управлением. О дальнейших перспективах читатели могут помечтать самостоятельно. А для темы этой главы важно, что подобные эксперименты наглядно демонстрируют правильность идей, высказанных еще И. М. Сеченовым в 1863 году в статье «Рефлексы головного мозга». Мысли материальны, а мозг – орган души – представляет собой устройство не менее вещественное, чем бетономешалка (хотя и гораздо более сложное). К нему вполне можно прикрутить пару-тройку дополнительных электромеханических «аксессуаров». Когда-нибудь – возможно, довольно скоро – они будут продаваться в магазинах.

Редукционизм

К сожалению, выводы науки о материальности мыслей и о том, что душа является продуктом работы мозга, очевидные для многих специалистов уже во времена Сеченова, большинству людей до сих пор не кажутся ни очевидными, ни бесспорными. Человек субъективно воспринимает себя как идеальную сущность, не связанную неразрывно с «бренным телом». Нам очень легко поверить в возможность существования души отдельно от тела и крайне трудно свыкнуться с тем банальным фактом, что никакой души без работающего мозга быть не может. По-видимому, это такой же адаптивный, то есть полезный для выживания,

самообман, как и упомянутое выше восприятие камней как сплошных, непроницаемых объектов. Пещерному человеку для выживания не нужно было знать, что нейтрино легко пролетит сквозь камень, не задев ни одного атомного ядра. Ему гораздо важнее было понимать, что сам он сквозь камень не пройдет. Так же и о материальной природе собственной психики незачем знать млекопитающему с зачаточными способностями к рефлексии, едва начавшему осознавать свое существование. Ему полезнее думать о себе и сородичах как о личностях, обладающих свободой выбора (о ней мы поговорим чуть позже). Отсюда – неприятие выводов нейробиологии широкими кругами общественности и даже отдельными учеными.

Когда дело доходит до научных диспутов, интуитивное неприятие рационализируется, облакаясь в наукоподобные аргументы. Самый типичный из них – обвинение всех «последователей Сеченова» в так называемом *редукционизме*. Звучит грозно, но, если разобраться, никакого смысла в этом нет. В данном контексте слово «редукционизм» – не более чем наукообразное ругательство.

Редукционизм – это «методологический принцип, согласно которому сложные явления могут быть полностью объяснены с помощью законов, свойственных явлениям более простым (например, социологические явления объясняются биологическими или экономическими законами). Редукционизм абсолютизирует принцип редукции (сведения сложного к простому и высшего к низшему), игнорируя специфику более высоких уровней организации»²⁵.

В утверждении о материальности души редукционизма не больше, чем в любом естественнонаучном объяснении того или иного явления природы. Никто и не думает сводить психику к простой сумме свойств нейронов и синапсов мозга. Разумеется, на каждом «уровне организации» работают свои специфические закономерности. Их нельзя игнорировать, но этого никто и не предлагает. Мы действительно никогда не сможем «полностью объяснить» человеческую психику только с помощью законов, действующих на более низком уровне – например, на уровне отдельных нейронов. Свойства мозга не сводятся к сумме свойств нервных клеток. Нужно еще знать, как эти клетки между собой связаны, как они взаимодействуют друг с другом и с окружающей средой. Если мы будем это знать в точности и во всех деталях, то действительно сможем объяснить психику и даже смоделировать ее на компьютере, создав искусственный интеллект (правда, компьютер для этого понадобится, похоже, на много порядков более мощный, чем нынешние). Но учет всех связей и взаимодействий – это как раз и есть переход к рассмотрению явления на более высоком «уровне организации». Никакого редукционизма здесь нет, а есть лишь обычный, классический естественнонаучный подход.

Точно так же не является редукционизмом утверждение, что живая клетка состоит из молекул, а молекулы – из атомов. Разумеется, если мы просто выпишем в столбик все вещества (типы молекул), имеющиеся в клетке, и для каждого укажем его количество, мы не поймем работу

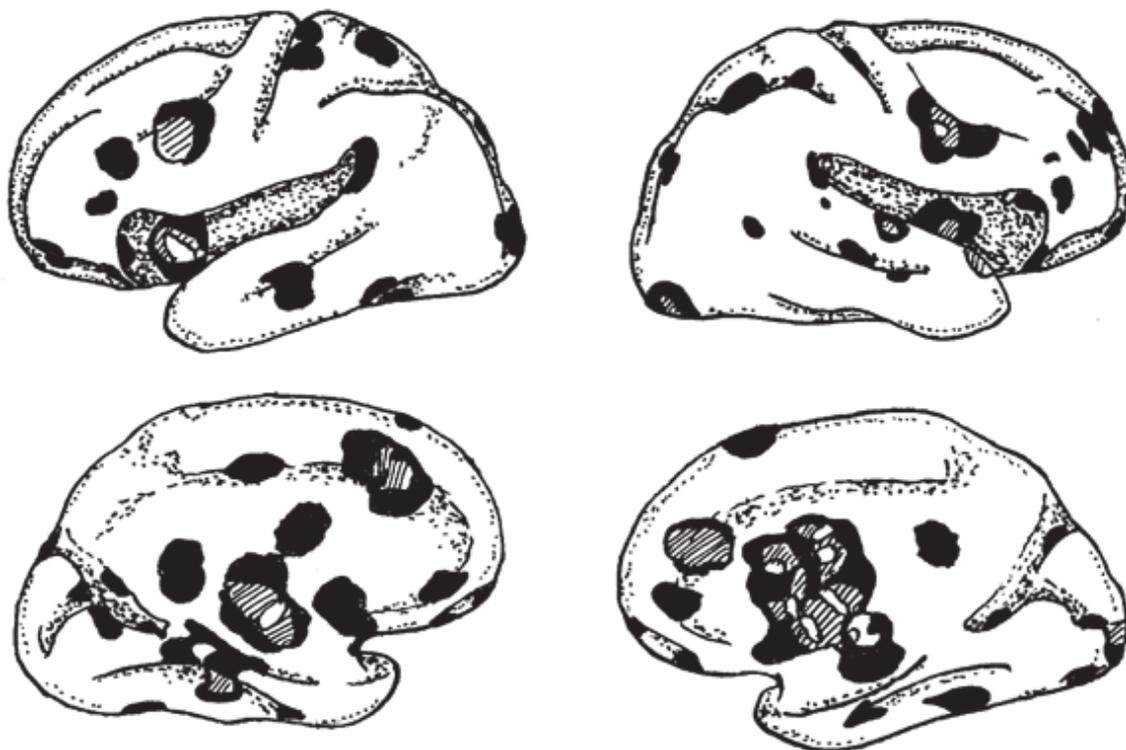
²⁵ Это определение взято из «Википедии», которую я ценю и уважаю как один из перспективных сегментов быстро развивающегося «мирового разума» – интернета. Другие определения могут отличаться в деталях, но суть понятия «редукционизм» здесь передана верно.

клетки. Свойства клетки не сводятся к сумме свойств ее молекул. Но если мы учтем еще и пространственное распределение этих молекул и все их взаимодействия друг с другом и с внешней средой, все их взаимные влияния и превращения, то тем самым мы перейдем на более высокий уровень и получим адекватную модель клетки как целостной живой системы. Только таким путем, сочетая анализ и синтез, мы можем разобраться в природе вещей. Холистические заклинания – абстрактные призывы рассматривать вещи только в их целостности – и обвинения в «редукционизме» нам в этом не помогут. По-моему, такие обвинения на самом деле говорят лишь о неприятии обвинителем принципа причинности, материализма и научного метода как такового.

Томография любви

В мозге млекопитающих существуют отделы, специализирующиеся на выполнении разных психических функций. При помощи современных методов, таких как ФМРТ, можно выявить отделы, задействованные в тех или иных психических процессах. В каких именно? Да в любых. Даже в самых замысловатых и возвышенных. Например, в любви.

Американские и швейцарские нейробиологи под руководством Стефани Ортиг из Сиракузского университета (США) недавно опубликовали обзор результатов всех проведенных на сегодняшний день исследований феномена любви, выполненных при помощи ФМРТ (*Ortigue et al., 2010*). Тщательный поиск в нескольких крупнейших электронных библиотеках показал, что таких исследований, где речь шла именно о любви, а не о каких-то смежных психических явлениях и эмоциях, где использовали ФМРТ и где были соблюдены все принятые методологические и этические нормы, выполнено пока только шесть (самое первое – в 2000 году). Одна из этих шести работ была проведена под руководством самой С. Ортиг (*Ortigue et al., 2007*). В трех работах приняли участие добровольцы, находящиеся (по их словам) в состоянии страстной романтической влюбленности. В двух работах изучалась материнская любовь, в одной – абстрактная беззаветная любовь к незнакомым несчастным людям. В общей сложности в шести исследованиях приняли участие 120 человек (99 женщин и 21 мужчина). В выборку не попали публикации, не имеющие английского резюме и не обнаруживаемые поисковиками по слову love.



Темными пятнами обозначены участки мозга, возбуждающиеся у любящих людей в ответ на стимулы, связанные с объектом любви (комбинированная схема, составленная по результатам шести исследований). Чем светлее оттенок в пределах пятна, тем в большем числе разных опытов, ориентированных на разные аспекты и разновидности любви, отмечалось повышенное возбуждение данного участка мозга. Верхние изображения – наружная поверхность полушарий, нижние – медиальная поверхность (“продольный срез” мозга). Слева – левое полушарие, справа – правое.

Метод ФМРТ позволяет выявить участки мозга, активно работающие в данный момент. К таким участкам приливает артериальная кровь, поэтому уже через 1–5 секунд после возбуждения там становится больше оксигемоглобина, что, собственно, и регистрируется на томограммах.

Чтобы понять, какие участки мозга связаны именно с любовью (или с чем угодно еще), всегда необходим контроль. Например, при изучении страстной любви сравнивали реакцию мозга на стимулы (фотографию или имя), относящиеся к объекту страсти, с реакцией мозга на такие же стимулы, относящиеся к друзьям (в том числе друзьям того же пола, что и объект страсти) и к незнакомым людям. Сравнение полученных томограмм позволяет идентифицировать участки, которые возбуждаются достоверно сильнее при мысли о любимом, чем о друге или незнакомце. При изучении материнской любви возбуждение мозга при взгляде на фотографию собственного ребенка сравнивалось с реакцией на фотографии других детей того же возраста, лучших друзей и просто знакомых.

По мнению авторов, имеющиеся на сегодняшний день данные следует считать предварительными (исследованные выборки пока еще очень малы, да и самих исследований проведено мало), но кое-какие закономерности можно отметить уже сейчас.

Романтическая (страстная) любовь, или влюбленность, связана с комплексным возбуждением нескольких отделов мозга.

Во-первых, это дофаминэргические (то есть использующие нейромедиатор дофамин) подкорковые области, отвечающие за положительное подкрепление (так называемая система награды). Возбуждение нейронов в этих областях порождает чувство удовольствия, эйфорию. Сюда относятся такие отделы мозга, как хвостатое ядро и скорлупа. Это те области, которые возбуждаются под действием кокаина. Кокаин подавляет обратное всасывание дофамина (его еще называют веществом удовольствия) нервными окончаниями, которые выделяют дофамин.

Во-вторых, при страстной любви возбуждаются отделы, имеющие отношение к сексуальному возбуждению: островок и передняя поясная кора.

В-третьих, снижается возбуждение уже знакомой нам миндалины (отвечает за страх, тревожность, беспокойство) и задней поясной коры. Похоже на то, что передняя поясная кора отвечает за переживание счастливой любви и сексуального возбуждения, тогда как задняя поясная кора активизируется при переживании несчастной любви или горя от утраты любимого – например, у вдов, которым показывают фотографию недавно умершего мужа. Любопытно, что в передней поясной коре находятся также центры, отвечающие за переживание (на сознательном уровне) чувства боли – как своей собственной, так и чужой.

В целом характер возбуждения подкорковых областей в ответ на стимулы, связанные с объектом страсти, указывает на то, что речь тут идет не только об эмоциях, но и о мотивации целенаправленного поведения (установка на сближение, соединение с любимым). Об этом говорит, в частности, возбуждение хвостатого ядра, работа которого связана с целеполаганием, ожиданием награды и подготовкой к активным действиям.

В-четвертых, когда влюбленным показывают на долю секунды имя любимого человека (так, чтобы они не успели даже осознать, что прочли его), регистрируется возбуждение нескольких «высших» (корковых) участков мозга, отвечающих за социальное познание (мыслительные процессы, отвечающие за взаимодействия с другими людьми, с обществом), концентрацию внимания и мысленную репрезентацию (образ) самого себя. Обнаружить связь этих «высших», когнитивных отделов со страстной любовью методологически труднее, чем «эмоциональных» областей, потому что сканирование обычно проводят в течение довольно длительного времени (17–30 секунд), за которое испытуемый успевает подумать о

многом. Эмоции сменяют друг друга не так быстро, как мысли. Но эта связь четко выявляется, если стимул, относящийся к объекту страсти (например, имя), не достигает сознания испытуемого.

Материнская любовь связана со специфическим возбуждением дофаминэргических подкорковых структур, в том числе хвостатого ядра, скорлупы, черного вещества и таламуса. Все это, очевидно, имеет отношение к чувству удовольствия и системе награды, и здесь много пересечений с теми областями, которые возбуждаются при страстной любви. Кроме того, материнская любовь связана с активностью тех же «эмоциональных» участков коры, что и страстная любовь (островок и передняя поясная кора). Однако у материнской любви есть и свой специфический подкорковый участок, который не имеет отношения к страстной любви, – центральное серое вещество. Этот участок тесно связан с эмоциональными центрами лимбической системы²⁶ и содержит много вазопрессиновых рецепторов, которые очень важны для формирования материнской привязанности. Прослеживается и еще одна связь между центральным серым веществом и материнской любовью: этот участок мозга имеет отношение к подавлению чувства боли при сильных эмоциональных переживаниях, в том числе во время родов.

В одном исследовании испытуемым показывали фотографии незнакомых умственно неполноценных людей и просили либо просто расслабиться (контроль), либо расслабиться и попытаться почувствовать (внушить себе) любовь к этому человеку. Выяснилось, что подобные попытки приводят к возбуждению примерно тех же участков мозга, что и материнская любовь. В том числе возбуждалось и центральное серое вещество. Активизировались также и эмоциональные центры, в том числе островок, хвостатое ядро и передняя поясная кора.

По мнению авторов, полученные результаты позволяют рассматривать любовь как «дофаминэргическую целеполагающую мотивацию к формированию парных связей» (*dopaminergic goal-directed motivation for pair-bonding*). Такое определение любви выглядит слегка необычно, зато оно подкреплено нейробиологическими данными. Не вызывает сомнений активное участие дофаминэргической системы награды, дофаминовых и окситоциновых рецепторов в формировании того психического состояния, которое мы называем любовью. Ясно также, что любовь – это не только чувство, переживание. Это еще и мотивация к активным действиям, направленным на формирование связи (эмоциональной или сексуальной) с объектом любви.

²⁶ Лимбическая система – совокупность эволюционно древних подкорковых структур мозга, отвечающих в основном за эмоциональную регуляцию и мотивацию поведения.

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.

Комментарии

1.

Это моя «любимая» фраза. Ее можно вставлять после почти каждого высказывания, относящегося к сфере естественных наук, и это будет правдой. Конечно, жизнь – штука очень сложная, поэтому любой биологический вывод, теория или модель всегда упрощает реальность. В устах опытных демагогов фразы типа «вы все упрощаете», «в действительности все сложнее» (вариант – «не занимайтесь редуccionизмом!») иногда становятся чем-то вроде универсального оружия против любых научных идей. Защититься от таких умников помогает следующая байка, восходящая к одному из рассказов Борхеса (Фрит, 2010). Говорят, что в некоей стране географы приобрели настолько большое влияние, что им предоставили возможность сделать самую подробную в мире географическую карту. По размеру она была равна всей стране и совпадала с ней во всех деталях. Пользы от этой карты не было никакой.

2.

Животные, чей мозг делает некачественные, лживые модели реальности, отсеиваются отбором. Это позволяет нам надеяться, что большинство наших представлений об окружающем мире более-менее правдивы (см. главу «Происхождение человека и половой отбор», кн. 1). Впрочем, для отбора важна не истинность модели, а лишь ее практичность. Если способность в каких-то ситуациях обманываться (не случайным, конечно, а неким вполне определенным образом) повышает репродуктивный успех, такая способность будет поддержана отбором, и мы будем систематически обманываться. Например, для выживания палеолитическому человеку незачем было понимать, что скалы в основном состоят из пустоты. С такой «чрезмерно правдивой» моделью реальности недолго и голову расшибить. Поэтому мы воспринимаем камни как непроницаемые, сплошные, плотные объекты. Что не совсем правдиво с точки зрения физики, зато очень практично.