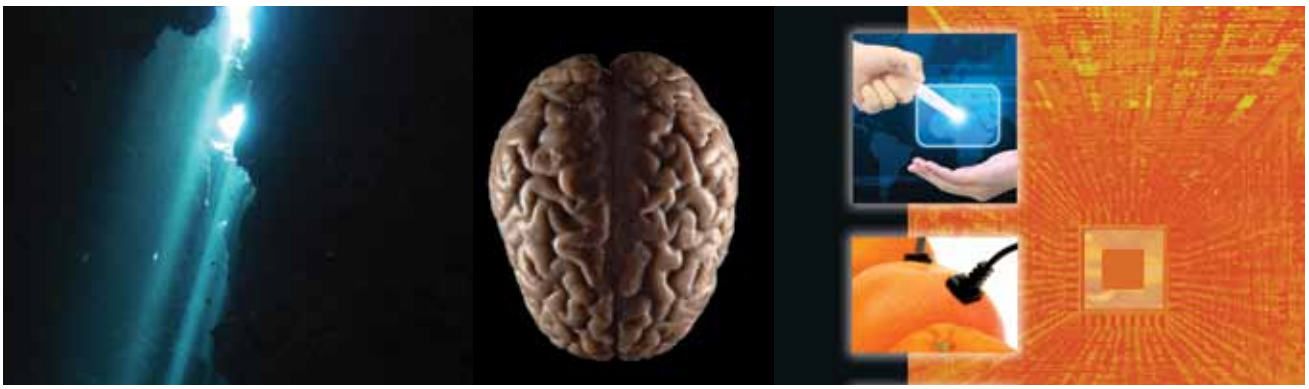


ДО ПРЕДЕЛА И ЗА ПРЕДЕЛЫ

Мы живем в эпоху стремительного наращивания научных знаний и постоянного пересмотра всех и всяческих границ, понимания невозможности какой бы то ни было определенности и в то же время – поиска неких ориентиров, системы координат, «точки сборки». И именно этот комплекс проблем стал лейтмотивом текущего выпуска журнала.

Так, статья, освещающая главную тему номера – «Пределы разумного» Дугласа Фокса, – рассматривает вопрос пределов развития человеческого интеллекта. Судя по данным большинства современных исследований, на пути у дальнейшей эволюции нашего разума стоят законы физики, и мы вряд ли сможем стать умнее, чем есть. Зато мы способны достичь новых интеллектуальных высот как общность: развитие технологий от письма до Интернета позволяет нам расширить наше сознание за пределами тела.

Хочется надеяться, что этот «коллективный интеллект», гораздо более мощный, чем умы единиц, поможет нам справиться с глобальным системным кризисом, угрожающей нашей цивилизации. Для того чтобы выжить, человечеству необходимо создать новую ноосферу – и о том, как это возможно, рассказывает статья Михаила Ковальчука и Олега Нарайкина «Конструктор для будущего».

С другой стороны, если говорить о физике, оказывается, что атомы нашего тела, возможно, когда-то побывали в межгалактическом пространстве. Мы – лишь часть грандиозного цикла преобразований барионов, происходящего во Вселенной. Так что, если смотреть на проблему оптимистически, пусть возможности нашего мозга и ограничены, и мы не можем не только понять того, субстанции какой природы составляют 96% нашей Вселенной, но и как следует разобраться с оставшимися 4%, уже само то, что человечество возникло, – огромная удача. Подробнее – в статье «Потерянные галактики» Джеймса Гича.

Отвлекаясь от космических масштабов, мы не можем не признать, что на Земле наши успехи несомненны. Об этапах покорения человеком гидросферы можно прочесть в статьях Александра Емельяненкова «Человек под водой», «Постижение глубины» и «За “Русью” – “Консул”». О стремительном развитии высоких технологий повествует материал Валерия Чумакова «А тележка и говорит...», рассказывающий об эволюции *RFID*-меток, которая вскоре должна привести к возникновению «умных магазинов», обходящихся без обслуживающего персонала.

Несомненны и серьезные проблемы, которые сопровождают развитие цивилизации. Так, в спорном вопросе глобального потепления постепенно начинают приходить к общему знаменателю и приверженцы этой гипотезы, и отъявленные скептики, хором предостерегая о том, что процесс действительно наблюдается и что масштабы его несопоставимы ни с одной климатической катастрофой из происходивших ранее (подробности – в интервью с Робертом Мюллером «Я принадлежу науке» и в статье «Последнее великое глобальное потепление» Ли Кампа).

Так что, поскольку оставить Землю и переселиться на другую планету мы пока не можем, способности же органично соответствовать природным законам (как, например, герои статей Кеннета Катаньи и Питера Форбса) уже тоже давно лишились, выход у человечества один: совместными усилиями гармонизировать ноосферу. ■

Редакция журнала «В мире науки»

Пределы разумного

Превращению человеческого мозга во все более мощную думающую машину вполне способны воспрепятствовать законы физики

Дуглас Фокс

Photograph by Adam Voorhes

ОБ АВТОРЕ

Дуглас Фокс (Douglas Fox) – свободный писатель, живущий в Сан-Франциско, часто публикуется в *New Scientist, Discover, Christian Science Monitor,* лауреат нескольких премий, последняя из которых – Премия за публикацию на важную тему от Американского общества журналистов и писателей.

Лауреат нобелевской премии испанский биолог Сантьяго Рамон-и-Кахаль (Santiago Ramon y Cajal), который картировал нейронные структуры насекомых в последнее десятилетие перед Первой мировой войной, сравнил мельчайшие схемы работы их зрительных нейронов с изысканными карманными часами. Что же касается млекопитающих, то, по его мнению, они напоминают скорее дедушкины пустотелые часы. Действительно, как это ни парадоксально звучит, но пчела с ее миллиграммовым мозгом может выполнять такие задачи, как ориентирование в лабиринте и на местности, столь же успешно, как и млекопитающие. Пусть интеллект медоносной пчелы и ограничен сравнительно небольшим числом нейронов, но она, безусловно, стремится выжать из них все возможное.

Другая крайность – слон: его мозг больше пчелиного в 5 млн раз, но столь же неэффективен, как расползающаяся Персидская империя. Для того чтобы совершить путешествие от одного участка мозга к другому, нервному импульсу требуется в 100 раз больше времени, чем в мозге пчелы, то же самое справедливо и для прохождения сигнала от мозга слона до его ног. В результате это животное вынуждено в меньшей степени полагаться на рефлексы, двигаться более медленно и растрачивать ценные ресурсы мозга на планирование каждого шага.

Мозг человека не настолько мал, как у пчелы, но и не так огромен, как у слона, однако лишь немногие люди понимают, что законы физики накладывают очень жесткие ограничения на наши умственные способности. Антропологи неоднократно размышляли об анатомических препятствиях на пути увеличения объема человеческого мозга, например сможет ли более крупная голова пройти через родовые пути двуногого. Если, однако, предположить, что эволюция решит эту проблему, то мы обнаружим другие, гораздо более существенные.

Так, возможно, мы станем умнее, если эволюционные процессы приведут к увеличению количества нейронов мозга или повышению скорости обмена информацией между ними. Но если суммировать результаты последних исследований по нескольким направлениям в этой области и довести их выводы до логического конца, то окажется, что такие хитрости быстро столкнутся с физическими ограничениями. Последние же восходят к самой природе нейронов и статистически допустимым возможностям передачи полезного сиг-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Возможно, человеческий интеллект почти достиг своего эволюционного предела. Различные исследования указывают, что большинство изменений, которые могут сделать нас умнее, ограничены законами физики.
- Например, увеличение размеров мозга до определенного момента ведет к усилению интеллекта, однако по мере дальнейшего роста его эффективность убывает: мозг начинает испытывать энергетический голод, а его работа замедляется. Улучшенные проводящие системы мозга также будут потреблять больше энергии и занимать непропорционально большое место.
- Более тонкие проводящие волокна попадают под термодинамические ограничения, аналогичные тем, которые возникают у транзисторов в компьютерных чипах: сигнал становится зашумленным.
- Однако, объединившись, люди могут достигнуть новых интеллектуальных высот. Развитие технологий от письма до Интернета позволяет нам расширить наше сознание за пределами тела.

нала при химическом обмене между нервными клетками. «Информация, шум и энергия неразрывно связаны между собой, – говорит Саймон Лафлин (Simon Laughlin), специалист по математическому моделированию нервной системы из Кембриджского университета. – Эта связь существует на уровне термодинамики».

Неужели законы термодинамики накладывают ограничения на интеллект, основанный на деятельности нейронов, универсальный для всех живых существ, будь то птицы, приматы, морские свинки или богомолы? Очевидно, данная проблема никогда не ставилась столь широко, но ученые, давшие интервью для этой статьи, согласились, что ее стоит обсудить. «Это очень интересный вопрос, – говорит Виджай Баласубраманиан (Vijay Balasubramanian), физик из Университета Пенсильвании, изучающий принципы кодирования информации нейронами. – Я никогда не сталкивался с тем, чтобы эта проблема обсуждалась даже в научной фантастике».

Конечно, интеллект – слишком широкое понятие: его трудно измерить и даже определить. Тем не менее нужно заметить, что согласно большинству тестов, люди – самые умные животные на Земле. Но не достигла ли по мере развития нашего мозга его способность перерабатывать информацию неких жестких ограничений? Возможны ли какие-либо физические границы для эволюции интеллекта, основанного на деятельности нейронов, не только для людей, но и для всех известных нам живых организмов?

Что за голодный солитер у вас в голове?

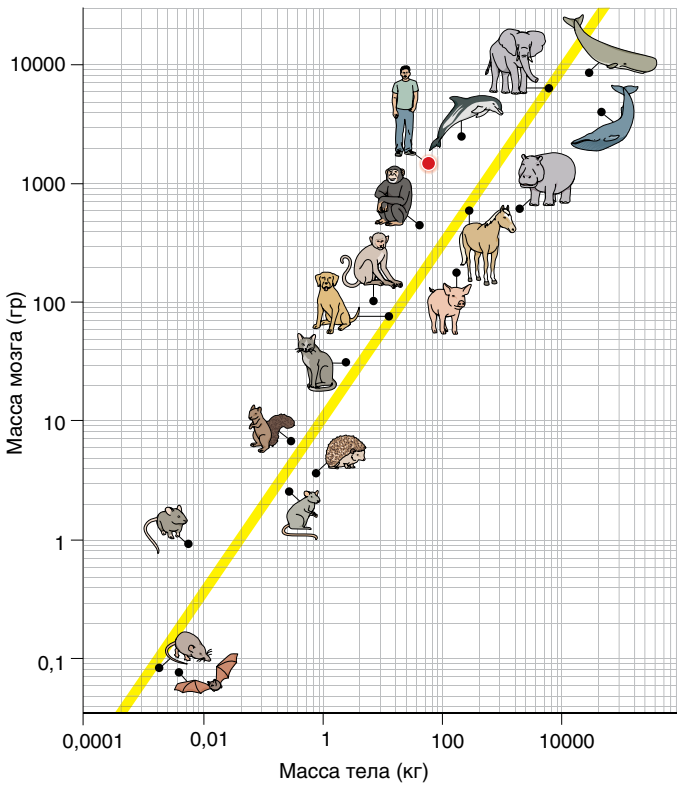
Интуитивно мы можем предположить, что мозг может стать гораздо мощнее, если увеличится в размерах. И действительно, возможная связь между размером мозга и интеллектом на протяжении 100 лет привлекала внимание ученых. Большую часть конца XIX в. и начала XX в. биологи занимались исследованиями универсальных закономерностей живого – математических законов, относящихся к массе тела, в особенности к массе мозга, действующих для всего царства животных. Одно из преимуществ крупного мозга – большее количество нейронов, которые, по видимому, должны способствовать увеличению его производительности. Но уже тогда стало понятно, что размер мозга не определяет интеллект: корова не умнее мыши, хотя обладает в 100 раз большим мозгом. Размер мозга увеличивается одновременно с размером тела, чтобы исполнять более тривиальные задачи. Например, возрастает нагрузка на нейроны, обеспечивающие «хозяйственные функции», не связанные с интеллектом, такие как мониторинг большего количества тактильных нервов, обработка сигналов с большей площади сетчатки и контроль над большим количеством мышечных волокон.

Эжен Дюбуа (Eugene Dubois), голландский анатом, открывший череп *Homo erectus* на острове Ява в 1892 г., пытался найти способ оценивать интеллект животных, исходя из размеров их ископаемых черепов. Поэтому он работал над определением точного математического соотношения между размерами мозга и тела, предполагая, что животные с непропорционально большим мозгом будут умнее. Дюбуа и другие ученые создали постоянно пополняющуюся базу данных по массе головного мозга и тела различных животных. Так, один классический трактат сообщал о весе тел, органов и желез 3690 животных от древесных тараканов до желто-белых цапель, двупалых и трехпалых ленивцев.

Последователи Дюбуа обнаружили, что мозг млекопитающих увеличивается медленнее, чем тело, его

ЖИВОТНЫЕ, ОТКЛОНЯЮЩИЕСЯ ПО РАЗМЕРАМ МОЗГА

Умнее они или нет, но у более крупных животных мозг обычно больше. Хотя размер мозга увеличивается не на фиксированную величину, а на три четверти от прироста массы тела – закон, который представлен ниже в виде прямой линии на логарифмической шкале. Необычайно умные животные отклоняются от этой шкалы и располагаются выше, чем должны были бы. Люди отступают от закона трех четвертей с коэффициентом 7,5, превосходя все остальные виды. Однако с определенного момента увеличение размеров мозга приносит обратные результаты



Graphic by Brown Bird Design

SOURCE: "BRAIN SIZE IN VERTEBRATES," BY P.A.M. VAN DONGEN, IN THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM OF VERTEBRATES, VOL. 3, EDITED BY R. NIEUWENHUYS ET AL., SPRINGER, 1998

прирост составляет приблизительно три четверти от роста массы тела. Так, ондатра, тело которой в 16 раз больше, чем тело мыши, имеет мозг примерно в восемь раз больше. Это открытие привело к появлению инструмента, который искал Дюбуа: коэффициента энцефализации (индекса энцефализации), образующегося при сравнении реальной массы мозга животного с той, которая была вычислена исходя из веса его тела. Другими словами, этот коэффициент показывает, во сколько раз данный вид отступает от закона трех четвертей. У людей коэффициент энцефализации равен 7,5 (т.е. наш мозг в 7,5 раза больше, чем предсказывает закон трех четвертей); у дельфинов афалин – 5,3; у обезьян он достигает 4,8; а у волов – всего лишь 0,5, что неудивительно. Короче говоря, интеллект может зависеть от количества нейронов, оставшихся в резерве после выполнения «черной работы», такой как обеспечение тактильной чувствительности. Таким образом, интеллектуальные способности коррелируют с размером головного мозга, по крайней мере при поверхностной оценке.

> «Нейроны серого вещества головного мозга работают с аксонами, которые во многом достигли своих физических пределов»
>
> Саймон Лафлин,
> Кембриджский университет

По мере роста мозга у млекопитающих и птиц они почти наверняка начинают извлекать выгоду из экономии на масштабе. Например, большее количество проводящих путей, по которым может путешествовать между нейронами любой сигнал, означает, что каждый сигнал имплицитно несет в себе больше информации, и, таким образом, в крупном мозге нейроны могут обходиться меньшим количеством импульсов в секунду.

В то же время возникает другая, конкурирующая тенденция: «Вероятно, существует “закон убывающего плодородия почвы” для бесконечного повышения интеллекта за счет добавления новых клеток мозга», – предполагает Баласубраманиан. Размер предъявляет свои требования, наиболее очевидное из которых – увеличение потребления энергии. Уже сейчас мозг человека – самая прожорливая часть тела: составляя всего 2% общей массы, этот маленький жадный «солитер» пожирает 20% калорий, которые мы расходуем в состоянии покоя. У новорожденных эта цифра достигает 65%.

Оставайтесь на связи

Большая часть энергетического потребления мозга связана с нервными сетями, связывающими его с различными органами. В человеческом мозге затраты на коммуникацию составляют 80% потребляемой энергии. Возможно, что по мере увеличения размеров нейронные сети становится все более энергозатратными по ряду тонких, структурных причин. На самом деле, хотя биологи продолжали собирать данные о размерах мозга до середины XX в., они занялись гораздо более сложным и смелым делом: определением общих «принципов проектирования» мозга, а также тем, как эти принципы работают в мозге различных размеров.

Типичный нейрон имеет длинный хвост, который называется аксоном. На своем конце аксон ветвится, образуя на кончиках ветвей синапсы, контактирующие с другими клетками. Аксоны, подобно телеграфным проводам, могут соединять между собой различные части мозга или образовывать нервы, которые простираются от центральной нервной системы в различные части тела.

На заре своей деятельности биологи измеряли диаметр аксонов под микроскопом, подсчитывали размер и плотность нервных клеток, а также количество синапсов, приходящихся на одну клетку. Они исследовали сотни, а иногда и тысячи клеток в мозге десятков видов. Стремясь усовершенствовать свои математические кривые и распространить их даже на самых больших животных, они научились извлекать неповрежденный мозг из китовой туши. Этот пятичасовой процесс был скрупулезно описан в 1880-х гг. биологом Густавом Адольфом Гульдбергом (Gustav Adolf Guldberg). Два человека, вооруженные пилой лесоруба, топором и стамеской, должны были приложить немало усилий для того, чтобы вскрыть верхнюю часть черепа.

Проведенные исследования показали, что по мере того как от вида к виду размеры мозга увеличиваются, в нем появляются некоторые тонкие и, по-видимому, неустойчивые изменения. Во-первых, возрастает средний размер нейронов. Это позволяет им подключаться к все большему количеству других нервных клеток, т.к. общее количество нейронов в головном мозге увеличивается. Но более крупные клетки располагаются в коре головного мозга менее плотно, так что возрастает расстояние между клетками, равно как и длина аксонов, необходимых для подключения. Удлинение аксона означает увеличение времени прохождения сигнала между клетками, поэтому для сохранения прежней скорости аксоны должны стать толще (толстые аксоны проводят сигналы быстрее).

Исследователи также обнаружили, что по мере увеличения мозга от вида к виду в его коре появляется все большее и большее число новых зон. Вы можете увидеть их, если окрасите ткани мозга и посмотрите на них в микроскоп: отдельные участки коры будут иметь разный цвет. Эти области часто соответствуют специализированным функциям, например пониманию речи и распознаванию лиц. С увеличением раз-

меров мозга такая локализация изменяется: функции аналогичных зон в левом и правом полушарии перестают совпадать, например в том, что касается распознавания речи и пространственной ориентировки.

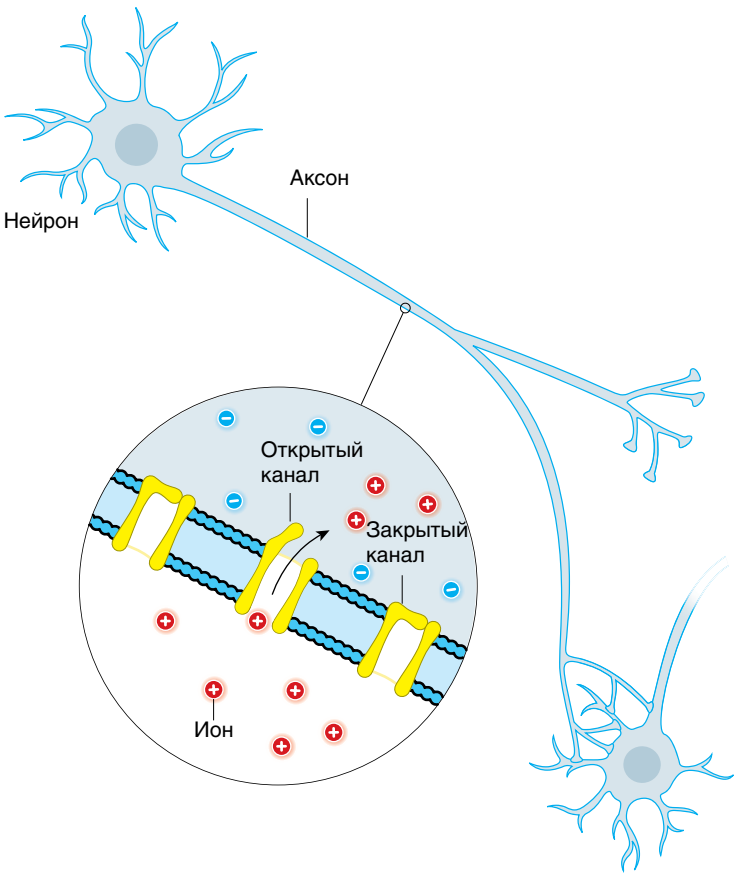
На протяжении десятилетий это разделение мозга на все более специализированные зоны рассматривалось как признак интеллекта. Но, по словам Марка Чангизи (Mark Changizi), специалиста по математическому моделированию нервной системы из лаборатории *2Ai* в г. Бойсе, штат Айдахо, правда в этом случае может оказаться гораздо более приземленной: специализация компенсирует проблемы с подсоединением, которые возникают в процессе увеличения мозга. Так, в мозге коровы содержится в 100 раз больше клеток, чем у мыши, соответственно, нейроны коровы не могут достаточно быстро создать между собой необходимые связи, подобные тем, которые возникают в мозге грызуна. Мозг решает эту проблему путем разделения функционирующих сходным образом нейронов на специализированные модули с тесной связью между клетками внутри модуля и с гораздо меньшим количеством отдаленных соединений между ними. Разделение функ-

ФИЗИКА МЫСЛИ

Так же как уменьшение транзисторов делает компьютеры более мощными, мозг с более мелкими компонентами, в принципе, более силен и быстр. Однако человеческие нейроны и в частности их длинные «хвосты» – аксоны, возможно, уже достигли своего физического предела или приблизились к нему.

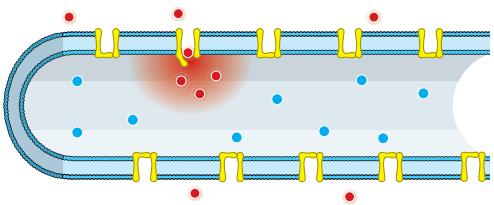
Аксоны позволяют нейронам создавать сети. Когда нейрон возбуждается, он посылает электрический импульс вдоль аксона, который затем воздействует на другие нейроны. Проведение импульса по аксону происходит с помощью открытия ионных каналов, встроенных в клеточную мембрану (*на рис.*), которые позволяют ионам входить в клетку. При поступлении достаточного количества ионов они изменяют электрическое напряжение на мембране, которое в свою очередь открывает соседние каналы, как при эффекте домино.

Более тонкие аксоны экономят место и потребляют меньше энергии. Природа, однако, кажется, уже сделала их столь тонкими, как они могут быть: немного тоньше, и случайное открытие каналов создаст слишком много шумов, а это означает, что по аксону будет проходить слишком много сигналов в отсутствии импульсов от нейрона



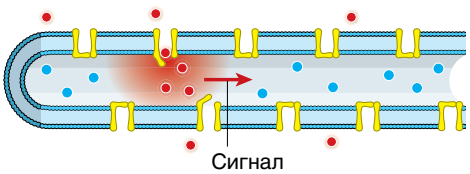
НЕСУЩЕСТВЕННАЯ ПОМЕХА

В типичном нейроне при случайном открытии ионных каналов они тут же закрываются до того, как это приведет к каким-либо последствиям



СЛУЧАЙНЫЙ КАСКАД

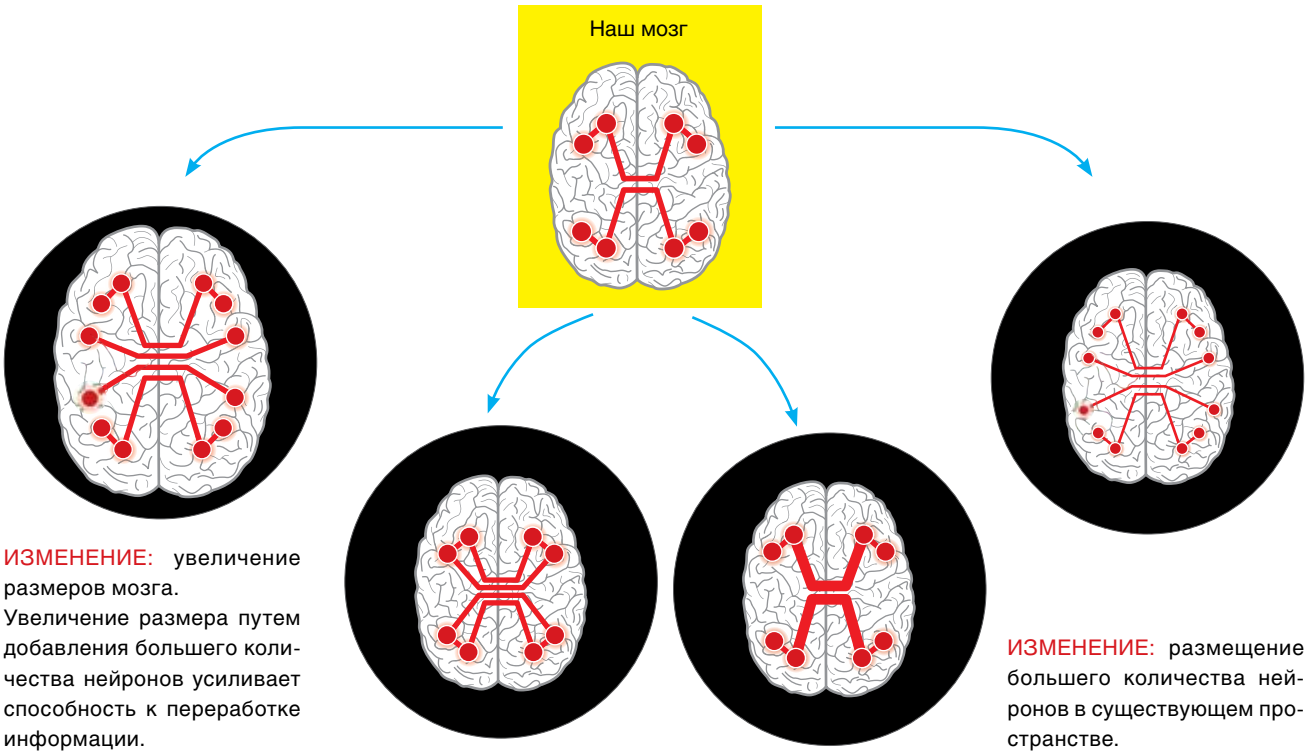
В более тонком аксоне при открытии одного канала шансы запустить соседние каналы и вызвать цепную реакцию возрастают



SOURCE: "ION-CHANNEL NOISE PLACES LIMITS ON THE MINIATURIZATION OF THE BRAIN'S WIRING," BY A. ALDO FAISAL, JOHN A. WHITE AND SIMON B. LAUGHLIN IN CURRENT BIOLOGY, VOL. 15, NO. 12, JUNE 21, 2005

ПОЧЕМУ МЫ НЕ МОЖЕМ СТАТЬ ГОРАЗДО УМНЕЕ?

Миниатюризация – это лишь одно из нескольких эволюционных изменений, которые могли бы, в принципе, улучшить наш интеллект. В то же время она имеет свои недостатки и наталкивается на термодинамические ограничения. Возможно, мы уже близки к максимально возможному уровню для интеллекта, основанного на работе нейронов



ИЗМЕНЕНИЕ: увеличение размеров мозга.
Увеличение размера путем добавления большего количества нейронов усиливает способность к переработке информации.
НЕДОСТАТКИ. Нейроны потребляют много энергии. С ростом мозга аксоны, или «провода», которые соединяют нейроны, должны стать длиннее, что делает их медленнее

ИЗМЕНЕНИЕ: увеличение количества связей между участками мозга.
Добавление дополнительных связей между удаленными нейронами позволяет отдельным участкам мозга общаться быстрее.
НЕДОСТАТКИ. Дополнительные проводящие пути тратят энергию и занимают много места

ИЗМЕНЕНИЕ: увеличение скорости прохождения сигнала.
Достигается путем утолщения аксонов.
НЕДОСТАТКИ. Толстые аксоны потребляют больше энергии (и занимают больше места), чем более тонкие

ИЗМЕНЕНИЕ: размещение большего количества нейронов в существующем пространстве.
Достигается путем уменьшения нейронов и/или утончения аксонов.
НЕДОСТАТКИ. Если нейроны слишком уменьшаются или аксоны становятся слишком тонкими, возрастает вероятность случайной импульсной активности

ИТОГ

Замедление обработки информации

Потребление слишком большого количества энергии

Передача сигнала подавляется шумами

Illustration by Brown Bird Design

ций между правым и левым полушариями играет аналогичную роль: оно уменьшает количество информации, проходящей между полушариями, и тем самым минимизирует количество длинных, межполушарных аксонов, которые мозгу необходимо поддерживать. «Все эти, казалось бы, сложные особенности большого мозга оказываются просто необходимыми приспособлениями, чтобы справиться с коммуникационными проблемами, возникающими по мере его роста, – заявляет Чангизи. – Они не показывают, что этот мозг умнее».

Ян Карбовски (Jan Karbowski), специалист по моделированию в нейронауках из Польской академии наук в Варшаве, согласен с предыдущим автором. «Каким-то образом мозг должен оптимизировать одновременно несколько параметров, не допуская при этом никаких компромиссов, – говорит он. – Если вы улучшаете одно, то портите другое». Что произойдет, например, если вы будете расширять мозолистое тело (пучок аксонов, связывающий правое и левое полушария) достаточно быстро для того, чтобы поддерживать устойчивую связь по мере роста мозга? А если вы будете утолщать аксоны для того, чтобы с увеличением мозга не возрастала задержка сигналов при прохождении между полушариями? Результаты будут неудовлетворительными. Мозолистое тело, расширяясь, оттеснит полушария в стороны, и таким образом вскоре любое повышение производительности будет нейтрализовано.

Эти особенности были ясно показаны в экспериментах, демонстрирующих соотношение между шириной аксонов и скоростью проведения. В конце концов, утверждает Карбовски, нейроны действительно становятся больше с увеличением размера мозга, но не настолько быстро, чтобы сохранить прежний уровень связи. С ростом мозга аксоны также становятся толще, но и это происходит недостаточно быстро, чтобы компенсировать все более длительные задержки проведения импульса.

По словам Баласубраманиана, невозможность слишком быстрого увеличения ширины аксонов экономит не только место, но и энергетические затраты. Удвоение ширины аксона удваивает расход энергии при увеличении скорости проведения импульсов приблизительно только на 40%. Но даже со всеми этими ухищрениями объем белого вещества (аксоны) по-прежнему растет быстрее, чем объем серого вещества (основная часть нейронов, содержащих ядро клетки), а мозг увеличивается в размерах. Другими словами, с ростом мозга все больше его объема отводится на проводящие пути, а не на отдельные клетки, которые фактически обрабатывают информацию. Это снова подтверждает, что наращивание размера в конечном итоге нежизнеспособно.

Примат приматов

Учитывая столь печальное положение дел, легко понять, почему корова не способна извлечь больше ума из своего мозга размером с грейпфрут, чем мышь, у которой он не более ягоды черники. Но эволюция также придумала впечатляющие обходные пути на уровне конструирования отдельных мозговых блоков. Когда в 2007 г. Джон Каас (Jon H. Kaas), нейробиолог из Университета Вандербильта, и его коллеги сравнили морфологию клеток головного мозга у целого ряда приматов, они наткнулись на ключевую особенность, которая, вероятно, и обусловила особое положение людей.

Каас обнаружил, что у приматов, в отличие от большинства других млекопитающих, с ростом мозга нейроны его коры очень мало увеличиваются в размерах. Некоторые нейроны действительно становятся больше, и эти редкие клетки обеспечивают поддержание хорошей связи. Но основная часть клеток не меняется. Таким образом, хотя мозг приматов растет от вида к виду, их нейроны остаются упакованными почти столь же плотно. Так, от мартышки к мирикине (трехполосому дурукулю) происходит удвоение массы мозга, и количество нейронов также увеличивается примерно вдвое, тогда как у грызунов с аналогичным удвоением массы мозга количество нейронов увеличивается всего на 60%. Это различие имеет огромные последствия. У людей 100 млрд нейронов упакованы в 1,5-2 кг мозга, но грызуну, мозг которого увеличивается согласно закону масштабирования, чтобы достигнуть такого числа нейронов, пришлось бы таскать за собой мозг весом в 45 кг. С точки зрения метаболизма такой мозг стал бы всепожирающим паразитом. «Возможно, это одно из объяснений того факта, что крупные грызуны, похоже, вообще не бывают умнее мелких», – говорит Каас.

Судя по всему, интеллект действительно связан с меньшими размерами и более плотной упаковкой нейронов. В 2005 г. нейробиологи Герхард Рот (Gerhard Roth) и Урсула Дике (Ursula Dicke) из Бременского университета в Германии рассмотрели ряд признаков, которые помогают предсказать уровень интеллекта у разных видов (измеряя его, грубо говоря, по сложности поведения) даже эффективнее, чем коэффициент энцефализации. По словам Рота, «факторы, тесно связанные с интеллектом, – это число нейронов в коре головного мозга, а также скорость проведения импульса», которая уменьшается с ростом расстояния между нейронами и возрастает с увеличением степени миелинизации аксонов. Миелин – липидная изоляция на аксоне, которая позволяет быстрее проводить сигналы.

Если Рот прав, то маленькие размеры нейронов приматов имеют двоякие последствия: во-первых, с ростом мозга они позволяют в значительной степени увеличить количество клеток в его коре; во-вторых, они обеспечивают более быструю связь, потому что клетки упакованы более плотно. Слоны и киты относительно умны, но увеличение у них размеров нейронов и самого мозга оказывается неэффективным. Как говорит Рот, у этих животных «плотность нейронов гораздо ниже, а это означает, что

расстояние между нейронами больше и скорость проведения нервных импульсов значительно ниже».

На самом деле, специалисты по нейронаукам недавно обнаружили аналогичные варианты организации деятельности мозга у человека: люди с более быстрыми связями между участками их мозга, кажется, обладают самым ярким интеллектом. В 2009 г. Мартин ван ден Хойвель (Martijn P. van den Heuvel) из Медицинского центра Университета Утрехта в Нидерландах использовал функциональную магнитно-резонансную томографию, чтобы определить, как различные области мозга общаются друг с другом, т.е. через какое количество промежуточных участков они связываются между собой. Ван ден Хойвель обнаружил, что наличие более коротких путей между различными областями мозга коррелировало с более высоким *IQ*. Специалист по нейровизуализации Эдвард Балмор (Edward Bullmore) и его коллеги из Кембриджского университета в том же году получили аналогичные результаты, используя другой подход. Они определили рабочую память (способность удерживать в памяти сразу несколько номеров) у 29 здоровых людей. Затем они записали магнитоэнцефалограмму с головы своих испытуемых, чтобы оценить, насколько быстро связывались между собой участки мозга. Люди с наиболее прямой коммуникацией и наиболее быстрой передачей информации между нейронами обладали лучшей рабочей памятью.

Это важное открытие. Мы знаем, что по мере увеличения мозга он вынужден ограничивать число прямых связей между различными участками, экономя пространство и энергию. Большой человеческий мозг имеет сравнительно немного таких длинных соединений. Но Балмор и ван ден Хойвель показали, что и эти редкие, прямые соединения непропорционально сильно влияют на интеллект: мозги, которые экономят ресурсы, сокращая даже несколько из них, работают заметно хуже. «Вы платите цену за интеллект, – заключает Балмор, – и цена эта заключается в том, что вы не можете просто минимизировать проводящие пути».

Дизайн интеллекта

Если связи между нейронами, а также между отделами мозга, и есть то самое узкое место, которое ограничивает интеллект, то появление еще более мелких и близко расположенных друг к другу нейронов с более быстрой связью между ними должно привести к повышению интеллекта. Аналогичным образом, мозг может работать эффективнее при появлении аксонов, которые могут передавать сигналы быстрее на большие расстояния, не становясь толще. Но что-то препятствует уменьшению нейронов и аксонов после определенного уровня. Можно назвать это основой всех ограничений: белки, с помощью которых нейроны генерируют электрические импульсы, так называемые ионные каналы, по сути своей ненадежны.

Ионные каналы – крошечные клапаны, которые открываются и закрываются в результате изменения молекулярной структуры белка. Открытые каналы позволяют ионам натрия, калия или кальция проходить через клеточную мембрану, создавая электрические сигналы и таким образом обеспечивая связь между нейронами. Но будучи столь микроскопическими, ионные каналы могут случайно открыться или закрыться даже благодаря простым тепловым колебаниям. Несложный биологический эксперимент демонстрирует этот недостаток. Изолируйте один ионный канал на поверхности нейрона, используя микроскопическую стеклянную трубку (это похоже на то, как вы на прогулке накрываете стеклянной чашкой одного муравья). Если вы измените напряжение на канале, это заставит его открыться или закрыться, однако он не переключается туда-сюда как выключатель на кухне. Канал включается и выключается в случайном порядке. Иногда он не открывается вообще; в других случая открывается, когда это не нужно. Все, что вы можете сделать, изменяя напряжение, – это изменить вероятность того, что канал откроется.

Это выглядит как ужасная эволюционная ошибка при проектировании мозга, но на самом деле это компромисс. По словам Саймона Лафлина, «если канал будет приводиться в действие слишком легко, то он будет включаться под действием шума», как это происходит в описанном ранее эксперименте. «Если же пусковой фактор будет слишком тугим, то вы получите меньше шума, – утверждает ученый, – но чтобы открыть его, потребуется большее усилие», и в результате затраты энергии на работу ионного канала возрастут. Другими словами, используя легко запускаемые каналы, нейроны экономят энергию, но в качестве побочного эффекта каналы могут открыться или закрыться под действием случайного фактора. Такая система надежно работает только в том случае, если используется большое количество каналов, открытие которых может «проголосовать» за то, что нейрон действительно генерировал импульс. Последнее, однако, становится проблематичным с уменьшением нейронов. «При уменьшении размеров нейронов вы сокращаете количество каналов, доступных для передачи сигнала, – говорит Лафлин. – В результате возрастает шум».

В двух статьях, опубликованных в 2005 и 2007 гг., Саймон Лафлин и его коллеги подсчитали, насколько необходимость использовать достаточное количество ионных каналов ограничивает возможности уменьшения аксонов. Результаты были поразительными. По словам Лафлина, «когда аксоны достигают примерно от 150 до 200 нанометров в диаметре, они становятся невероятно шумными». В такой ситуации аксон содержит так мало ионных каналов, что случайное открытие даже одного из них может привести к передаче сигнала в отсутствие импульсной активности нейрона. Мельчайшие существующие аксоны, вероятно, разряжаются приблизительно шестью случайными импульсами в секунду. Если их еще чуть-чуть уменьшить, то они начнут посылать сигналы более чем

100 раз в секунду. «Нейроны серого вещества коры головного мозга работают с аксонами, которые достаточно близки к физическому пределу», – заключает ученый.

Этот фундаментальный компромисс между информацией, энергией и шумом не уникален для биологии. Он действует везде, начиная от оптоволоконной связи и до радиолюбительской связи и компьютерных чипов. Транзисторы играют роль привратника для электрических сигналов, так же как и ионные каналы. В течение пяти десятилетий инженеры постоянно уменьшали транзисторы, все плотнее набивая их в чипы, чтобы создать все более быстрые компьютеры. В последних чипах величина транзисторов составляет 22 нм. При таких размерах становится очень сложно равномерно добавлять к кремнию присадки (небольшие количества других веществ, необходимых, чтобы получить свойства полупроводника). К тому моменту, когда транзисторы достигнут размеров приблизительно 10 нм, они будут настолько малы, что случайное присутствие или отсутствие одного атома бора заставит их вести себя непредсказуемо.

Инженеры могут обойти ограничения современных транзисторов, возвращаясь к чертежной доске и реорганизуя чипы с использованием совершенно новых технологий. Но эволюция не может начинаться с нуля: она должна работать с теми схемами и частями, которые просуществовали полмиллиарда лет, объясняет Генрих Райхерт (Heinrich Reichert), нейробиолог из Базельского университета в Швейцарии, занимающийся проблемами развития, – это как строительство линкора из модифицированных частей самолета.

Более того, есть еще одна причина сомневаться, что эволюционный скачок приведет к росту интеллекта. Когда впервые появились нейроны, природа располагала множеством вариантов, но 600 млн лет назад произошла удивительная вещь. По словам Рота, мозги пчелы, осьминога, ворона и млекопитающих с высоким интеллектом на первый взгляд не похожи между собой. Но если посмотреть на нейронные схемы, которые применяются для решения таких задач, как зрение, обоняние, пространственная ориентировка и эпизодическая память о последовательности событий, «удивительно, но все они имеют абсолютно одинаковые базовые структуры». Такая эволюционная конвергенция обычно предполагает, что определенные анатомические или физиологические системы достигли оптимального уровня, так что дальнейшее их улучшение маловероятно.

В таком случае возможно, что живые организмы достигли оптимальной нейронной модели. Она разрастается шаг за шагом в удивительном танце, при котором клетки растущего эмбриона взаимодействуют через сигнальные молекулы и физические стимулы, и это эволюционно закреплено.

Пчелы делают это

Итак, неужели сложность человеческого мозга достигла физического предела, учитывая доступные для нас строительные блоки? Саймон Лафлин сомневается, что существуют какие-либо жесткие ограничения функций мозга за исключением скорости света. По его словам, «более вероятно, что срабатывает закон убывающей отдачи: чем больше вы вкладываете в это, тем меньше и меньше получаете в ответ». Наш мозг может вместить только определенное количество нейронов; эти нейроны могут установить между собой только определенное количество связей; и эти связи могут проводить только определенное количество импульсов в секунду. Более того, если наши тело и мозг станут намного больше, это приведет к увеличению потребления энергии, отвода тепла и времени, которое потребуется для передачи нервных импульсов из одной части мозга к другой.

Однако возможны более эффективные способы расширения человеческого разума без необходимости дальнейшей биологической эволюции. В конце концов, пчелы и другие социальные насекомые справляются с этим: действуя совместно со своими сестрами по улью, они формируют коллективное образование, которое умнее, чем сумма его частей. Мы тоже научились объединять наши интеллекты через социальное взаимодействие.

Кроме того, существует еще и технология. На протяжении тысячелетий письменность давала нам возможность хранить информацию за пределами нашего тела и обеспечивать возможности для запоминания информации, далеко выходящие за пределы нашего мозга. Можно утверждать, что Интернет – конечный результат тенденции к экспансии интеллекта за пределы тела. В некотором смысле утверждение, что Интернет оглупляет человека, может быть правдой: наличие коллективного человеческого разума, воплощенного в определенной модели культуры и в существовании компьютеров, понижает мотивацию к развитию индивидуального ума.■

Перевод: А.Я. Басова

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

■ Evolution of the Brain and Intelligence. Gerhard Roth and Ursula Dicke in Trends in Cognitive Sciences, Vol. 9, No. 5, pages 250-257; May 2005.

■ Cellular Scaling Rules for Primate Brains. Suzana Herculano-Houzel, Christine E. Collins, Peiyan Wong and Jon H. Kaas in Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Vol. 104, No. 9, pages 3562-3567; February 27, 2007.

■ Efficiency of Functional Brain Networks and Intellectual Performance. Martijn P. van den Heuvel, Cornelis J. Stam, Rene S. Kahn and Hilleke E. Hulshoff Pol in Journal of Neuroscience, Vol. 29, No. 23, pages 7619-7624; June 10, 2009.