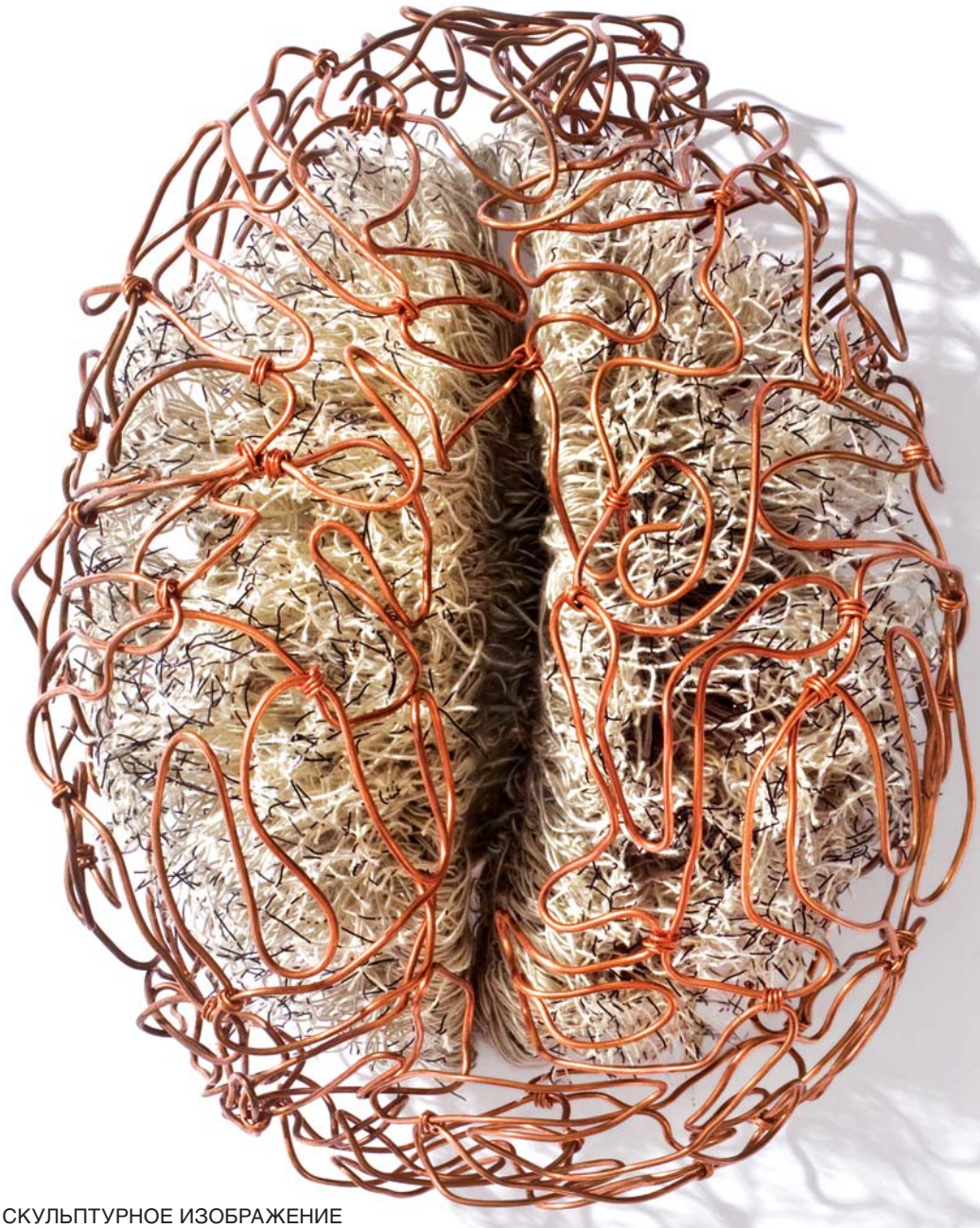
Вещественность белого вещества

Дуглас Филдз



СКУЛЬПТУРНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ коры мозга (сделана из медной проволоки) и находящегося под ней белого вещества

Ученые издавна считали белое вещество пассивной инфраструктурой мозга. Однако новые исследования показывают, что оно активно участвует в обучении, а также в развитии психических заболеваний

Представьте, что возможно заглянуть внутрь головы и увидеть, почему один человек умнее другого. Или же узнать, что какие-то скрытые особенности мозга ведут к развитию шизофрении или дислексии. Новый метод томографического исследования позволяет ученым получать именно такие сведения и раскрывает удивительную вещь: на интеллект, как и на психическое здоровье, влияют тракты, расположенные в глубине мозга и состоящие исключительно из белого вещества.

В сером веществе нашего мозга происходит умственная работа и хранится память. Кора представляет собой почву на поверхности мозга, состоящую из плотно упакованных тел нервных клеток, называемых нейронами, где как раз и принимаются решения. Глубже лежит «коренная порода» — белое вещество, занимающее примерно половину объема мозга человека (намного больше, чем у животных). Белое вещество состоит из миллионов соединительных волокон, каждое из которых представляет собой отдельный длинный отросток нервной клетки, или аксон, одетый в белое жироподобное вещество, называемое миелином.

Нейрофизиологи десятилетиями не проявляли должного интереса к белому веществу. Они считали миелин простой изоляцией, а находящиеся внутри аксоны — не более чем электрическими проводами, которые подобно магистральным телефонным линиям, связывающим районы страны, соединяют между собой нейроны различных областей мозга.

В теориях, объясняющих механизмы обучения, памяти и развитие психических расстройств, основное внимание уделялось молекулярным событиям в нейронах и знаменитых синапсах — крошечных точках контакта между нейронами. Однако теперь ученые начинают понимать, что недооценивали важность белого вещества для передачи информации между областями мозга. Новые исследования показывают, что степень его развития различна у людей с разными нарушениями функционирования мозга или индивидуальным опытом. Оно также меняется, когда человек осваивает или совершенствует какой-нибудь навык, например игру на фортепиано. Даже несмотря на то что именно нейроны в сером веществе обеспечивают умственную и физическую активность, функционирование белого вещества может быть не менее критично для приобретения различных знаний. И здесь надо искать ответ на вопрос, почему старую собаку трудно научить выполнять новые команды.

Чем выше мастерство, тем больше белого вещества

Миелин, придающий белому веществу его цвет, всегда таил в себе много загадок. Более ста лет ученые смотрели на нейроны через свои микроскопы и видели длинные волокна — аксоны, выходящие из тела нейрона и направляющиеся к соседнему нейрону. Было обнаружено, что каждый аксон покрыт толстым слоем прозрачного геля. Анатомы предположили, что жироподобное вещество изолирует аксоны подобно резиновой оболочке на медном проводе. Странным, однако, было то, что многие из них, в особенности самые тонкие, не были ничем покрыты. И даже на изолированных волокнах примерно через каждый миллиметр были заметны разрывы в изоляции. Такие оголенные участки стали называть перехватами Ранвье в честь впервые описавшего их французского анатома Луи-Антуана Ранвье (Louis-Antoine Ranvier).

В результате современных исследований было обнаружено, что если аксон покрыт миелином, то нервные импульсы бегут по нему примерно в 100 раз быстрее. Миелин намотан на аксон подобно изоленте, обернутой до 150 раз вокруг участка волокна между перехватами. Плоские слои этого вещества синтезируются двумя типами глиальных клеток, которые не являются нейронами, однако численно преобладают в мозге и во всей нервной системе (*см.: Филдз Д. Другая часть мозга // ВМН, № 7, 2004*). Обертывание аксона выполняет глиальная клетка олигодендроцит, по форме напоминающая осьминога. Оболочка предотвраща-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Белое вещество, издавна считавшееся пассивным, на самом деле активно влияет на процессы обучения и участвует в развитии ряда психических заболеваний.
- Несмотря на то что мышление и обработка информации выполняются в сером веществе (состоящем из нейронов), белое вещество (состоящее из аксонов, покрытых миелином) регулирует обмен сигналами между нейронами и координирует совместную работу различных областей мозга.
- Новая технология — диффузионно-тензорная магниторезонансная томография (ДТ-МРТ) — впервые позволила увидеть белое вещество в действии, раскрыв его недооцененную роль.
- К моменту рождения миелин формируется лишь частично и продолжает постепенно развиваться до тех пор, пока мы не достигнем возраста в 20 с лишним лет. Время и степень миелинизации могут влиять на обучение, степень самоконтроля и развитие таких заболеваний, как шизофрения, аутизм и даже патологическая склонность ко лжи.

SCULPTURE BY MARGIE MCDONALD, PHOTOGRAPHED BY FRANK ROSS

ет утечку электрического сигнала и обеспечивает быстрое «перепрыгивание» импульсов по аксону от одного перехвата к другому. В нервах за пределами головного и спинного мозга миелин образуют другие глиальные клетки, называемые Шванновскими и имеющие форму сосиски.

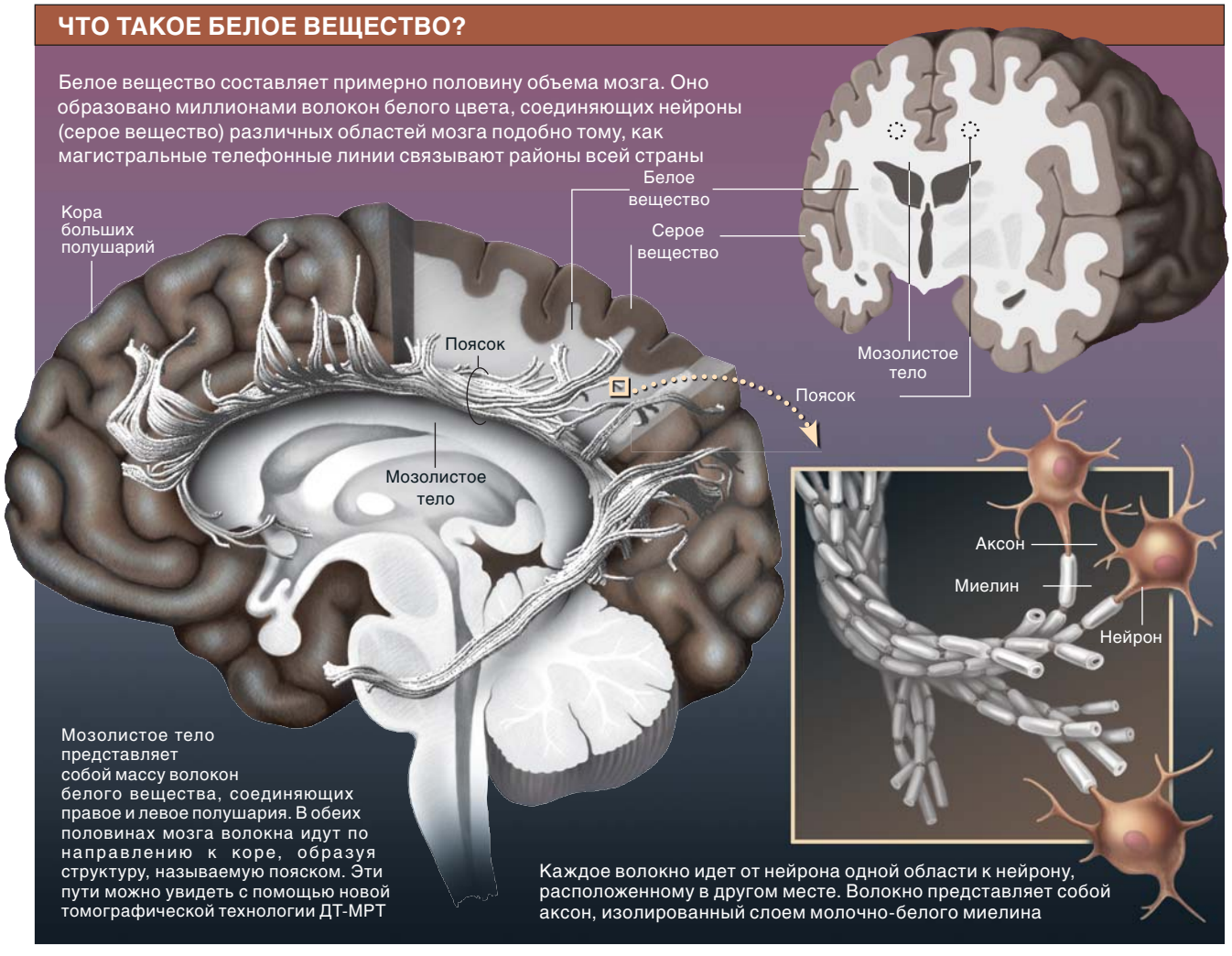
При отсутствии миелина происходит утечка сигнала, и он затухает. Для того чтобы обеспечить максимальную скорость проведения, толщина изоляции должна находиться в строго определенной пропорции к диаметру волокна внутри нее. Оптимум достигается, когда отношение толщины аксона к суммарной толщине волокна (включая миелин) составляет 0,6. Мы не имеем представления о том, как олигодендроциты «узнают», когда требуется 10, а когда 100 слоев, чтобы достичь необходимой толщины волокна для аксонов различного диаметра. Однако недавно биолог Клаус-Армин Наве (Klaus-Armin Nave) из Института экспериментальной медицины Макса Планка в Геттингене, обнаружил, что Шванновские клетки реагируют на белок нейрорегулин, находящийся на поверхности аксона. Они, в зависимости от того, увеличивается или уменьшается количество этого белка, создают соответственно больше или меньше слоев миелина вокруг аксона. Интересно, что у многих людей, страдающих биполярным расстройством или шизофренией, существует дефект в гене, который регулирует синтез нейрорегулина.

У человека процесс миелинизации протекает постепенно. В момент рождения лишь в нескольких областях мозга содержится достаточно большое количество миелина, который затем к 25—30 годам неравномерно распространяется и откладывается в отдельных местах. Миелинизация обычно идет волной от затылочной коры больших полушарий к лобной по мере взросления. Соответственно, в лобных долях она происходит позже всего. Эти области ответственны за сложные рассуждения, планирование действий и суждения — а такие навыки приходят лишь с опытом. Исследователи предполагают, что недостаточная миелинизация является одной из причин того, что подростки не способны принимать ответственные решения так же, как взрослые.

Предположительно, в человеческом мозге миелинизация аксонов

ЧТО ТАКОЕ БЕЛОЕ ВЕЩЕСТВО?

Белое вещество составляет примерно половину объема мозга. Оно образовано миллионами волокон белого цвета, соединяющих нейроны (серое вещество) различных областей мозга подобно тому, как магистральные телефонные линии связывают районы всей страны

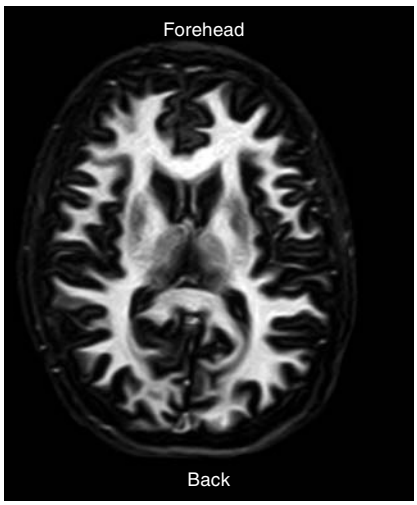


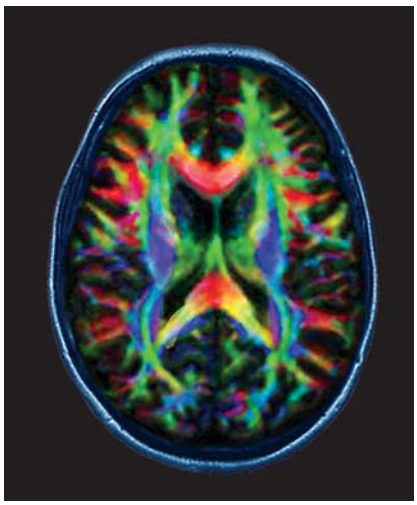
Мозолистое тело представляет собой массу волокон белого вещества, соединяющих правое и левое полушария. В обеих половинах мозга волокна идут по направлению к коре, образуя структуру, называемую пояском. Эти пути можно увидеть с помощью новой томографической технологии ДТ-МРТ

Каждое волокно идет от нейрона одной области к нейрону, расположенному в другом месте. Волокно представляет собой аксон, изолированный слоем молочно-белого миелина

JEN CHRISTIANSEN (illustration); DEREK JONES Cardiff University (cingulum tractography)







Традиционный магниторезонансный томограф может лишь приблизительно обрисовать расположение белого вещества (*внизу слева, белые области*). Однако новый метод, названный ДТ-МРТ, показывает гораздо более детальную структуру (*внизу справа*); красным и желтым цветом обозначено более высокоорганизованное белое вещество

COURTESY OF R. DOUGLAS FIELDS (Fields); PHILIPS HEALTHCARE (machine); ZEPHYR/ PHOTO RESEARCHERS, INC. (color scan); JOE GALLIVAN Ulster Medical and Surgical Specialists (black-and-white scan)

не завершается до полового созревания, поскольку до этого времени волокна продолжают расти, обретают новые ветви и лишаются старых в зависимости от индивидуального опыта данного человека. После того как они покрываются миелином, в них могут происходить лишь более ограниченные изменения. Ученых волнует, действительно ли миелин обеспечивает познавательные способности, или же когнитивные процессы просто ограничены в тех областях, где он еще не сформировался?

Фредрик Уллен (Fredrik Ullen), виртуозный пианист, а также доцент Стокгольмского Института мозга (*Stockholm Brain Institute*) в Швеции, решил это выяснить. Для исследования мозга профессиональных пианистов он в 2005 г. воспользовался новой технологией визуализации мозга — диффузионно-тензорной магниторезонансной томографией (ДТ-МРТ). ДТ-МРТ выполняется с помощью аппаратуры, сходной с обычными магниторезонансными томографами, которые устанавливают в больницах, однако в них используется другой тип магнитного поля и другие алгоритмы создания серии изображений — срезов мозга, на основе которых строится трехмерная картина. На срезах отображаются векторы (математически определенные как тензоры) диффузии воды сквозь ткани. В сером веществе сигнал ДТ-МРТ относительно слабый, поскольку вода диффундирует симметрично во всех направлениях. Однако она проникает в определенном направлении вдоль пучков аксонов, что позволяет увидеть белое вещество, выявляя основные пути передачи информации, текущей между областями мозга. Чем более плотно упакован миелин и чем он толще, тем сильнее сигнал ДТ-МРТ.

Уллен обнаружил, что у профессиональных пианистов определенные области белого вещества более развиты, чем у людей, не имеющих отношения к музыке. Это участки, соединяющие области коры больших полушарий, которые критически необходимы для координированных движений пальцев, с областями, занятыми другими когнитивными процессами, вовлеченными в исполнение музыки.

Уллен также установил, что чем больше часов в день музыкант тратит на упражнения, тем сильнее становится сигнал ДТ-МРТ. Разумеется, аксоны могут просто утолщаться, требуя больше миелина для поддержания оптимального соотношения 0,6, однако без проведения аутопсии данный вопрос разрешить невозможно. И все же данное открытие крайне важно, поскольку показывает, что при обучении сложному навыку происходят заметные изменения в белом веществе — области мозга, в которой нет тел нервных клеток или синапсов, а имеются лишь одни аксоны и глия. Исследования на животных показывают, что миелин может изменяться в ответ на индивидуальный опыт и условия среды, в которой развивается данная особь. Недавно нейробиолог Уильям Гриноу (William T. Greenough) из Иллинойского университета в гг. Эрбана и Шампейн подтвердил, что крысы, выращенные в «обогащенной» среде (с большим количеством игрушек и интенсивным социальным взаимодействием) имели больше миелинизированных волокон в мозолистом теле — массивном тяже аксонов, соединяющем два полушария мозга.

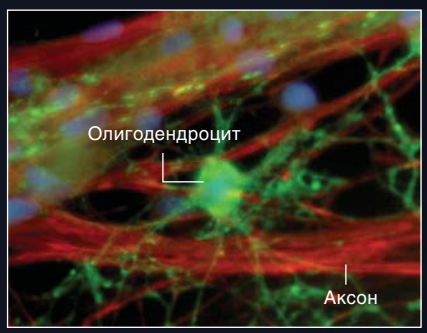
Похоже, полученные данные согласуются с результатами исследований с применением ДТ-МРТ, выполненными нейробиологом

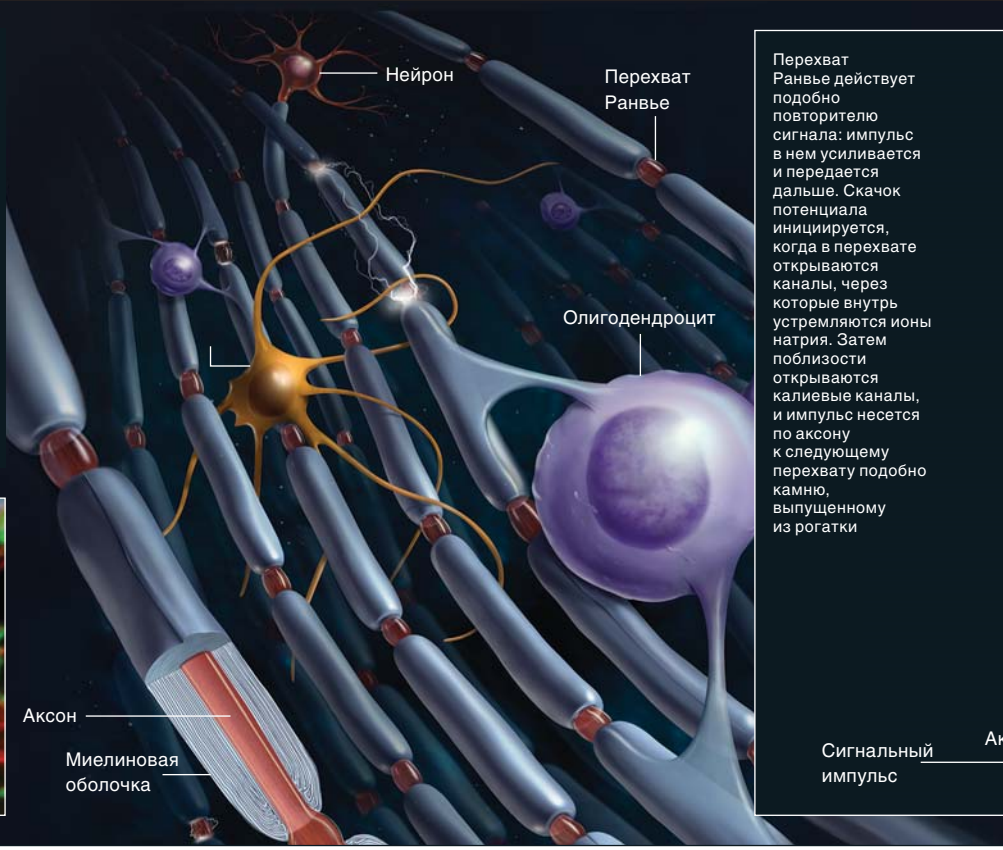
ОБ АВТОРЕ

Дуглас Филдз (R. Douglas Fields) возглавляет отдел развития нервной системы и пластичности в Национальном институте детского здоровья и развития человека

ФОРМИРОВАНИЕ МИЕЛИНА

Длинные аксоны, изолированные миелином, несут сигналы между нейронами быстрее, чем немиелинизированные аксоны. Клетки, называемые олигодендроцитами, производят эту жироподобную оболочку и наматывают ее на аксон толщиной от 10 до 150 слоев. На процесс миелинизации могут влиять различные факторы; клетки, называемые астроцитами, «прослушивают» сигналы, идущие по аксонам, и передают химические сообщения олигодендроцитам. Внизу на микрофотографии показано, как происходит миелинизация аксона (*аксон окрашен в красный цвет*)





Винсентом Шмитхорстом (Vincent J. Schmithorst) из Детского госпиталя Цинциннати, который сравнил белое вещество у детей в возрасте от 5 до 18 лет. Более выраженное развитие его структуры коррелировало с более высоким *IQ*. В других работах было показано, что у детей, страдающих тяжелым нарушением внимания, белого вещества в мозолистом теле содержится на 17% меньше.

Стимуляция к переменам

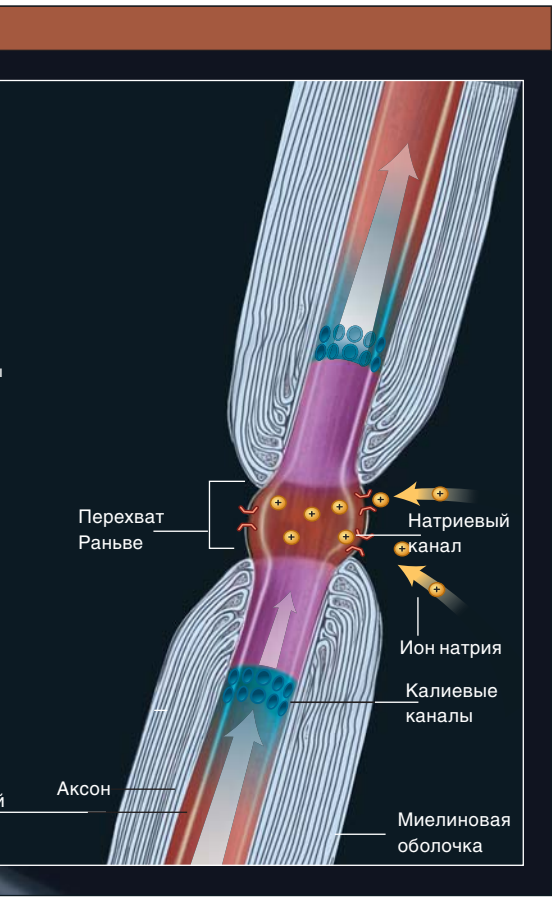
Накопленные данные указывают на то, что опыт влияет на формирование миелина, который обеспечивает обучение и совершенствование навыков. Но чтобы полностью убедиться в истинности такого вывода, исследователям необходимо найти четкое объяснение того, как обилие жироподобного вещества может улучшить мышление, а также обнаружить какие-либо прямые доказательства того, что дефекты миелинизации нарушают умственные способности.

Мы с коллегами выявили несколько путей, по которым индивидуальный опыт может влиять на образование миелина. Нейроны, находящиеся в мозге, посылают по своим аксонам электрические импульсы. Выращивая нейроны из культуры зародышевой ткани мышей в чашках, снабженных платиновыми электродами, мы можем навязать им тот или иной характер импульсов. В результате было обнаружено, что импульсы могут регулировать определенные гены в нейронах. Один из таких генов вызывает синтез клейкого белка под названием *L1-CAM*, который критически необходим в начале образования миелиновой оболочки для прикрепления первого слоя миелина к аксону.

Мы также обнаружили, что глия способна «прослушивать» импульсы, идущие по аксону, и что услышанный ею поток импульсов определяет степень миелинизации. Глиальная клетка под названием астроцит, чувствуя усиление потока импульсов, выделяет определенный химический агент. Этот химический код заставляет олигодендроциты образовывать больше миелина. Мутация в гене астроцитов имеется у детей, страдающих болезнью Александера, наследственным смертельным заболеванием ЦНС, проявляющимся отставанием в умственном развитии и характеризующимся нарушением образования миелина.

Как белое вещество влияет на когнитивные способности? По аналогии с Интернетом может показаться, что вся информация в мозге должна передаваться как можно быстрее. Это означало бы, что все аксоны должны быть миелинизированы в равной степени. Однако для нейронов быстрее не всегда значит лучше. Информация должна передаваться на значительные

VARSHA SHUKLA (micrograph); ALAN HOOFRING NIH Medical Arts (illustration)



ALAN HOOFRING NIH Medical Arts AND JEN CHRISTIANSEN (inset)

расстояния между нервными центрами, каждый из которых выполняет свою специальную функцию и посылает информацию в другую область для следующего шага анализа. В случае сложного обучения (например, игре на фортепиано), информация должна распространяться между многими областями; сигналы, проходящие разные расстояния, должны прибыть в одно место в определенный момент времени. Для того чтобы это происходило точно, необходимы задержки. Если бы все аксоны передавали информацию с максимальной скоростью, то сигналы от удаленных нейронов приходили бы позже, чем от соседних. Обычно импульсу требуется 30 миллисекунд на то, чтобы пройти из одного полушария в другое по миелинизированному аксону, и 150—300 мс — по немиелинизированному. Ни одно из волокон мозолистого тела не миелинизировано при рождении, а к периоду полового созревания таковыми остается 30%. Разнообразие волокон позволяет координировать скорости передачи.

Вероятно, столь же важны перехваты Ранвье. В последние годы ученые пришли к заключению, что они действуют как сложные биоэлектрические ретрансляторы — передающие станции, которые генерируют, регулируют и быстро пересылают электрические сигналы по аксону. Изучая потрясающе чуткий слух у сов, нейробиологи установили, что во время миелинизации олигодендроциты образуют на некоторых аксонах больше перехватов, чем требуется для оптимально быстрого проведения сигнала. Это происходит для того, чтобы замедлить перемещение сигналов.

Очевидно, что скорость передачи импульсов является жизненно важным аспектом функционирования мозга. Мы знаем, что память и обучение возможны при том условии, что в некоторых нейронных сетях происходит усиление связей между нейронами. Вероятно, миелин влияет на эту силу, изменяя скорость проведения таким образом, чтобы разряды электрических импульсов прибывали на один и тот же нейрон одновременно по множеству аксонов. Когда возникает такая конвергенция, отдельные отклонения потенциала суммируются, увеличивая силу сигнала и таким образом обеспечивая усиление связи между данными нейронами.

Обучение и психические расстройства

В свете новой теории несложно представить, как задержки проведения по волокнам могут вести к нарушениям психических и когнитивных процессов. Десятилетиями ученые искали причины психических заболеваний в сером веществе, однако теперь появились данные, показывающие, что белое вещество играет не менее важную роль. Например, дислексия возникает при нарушении временных задержек в нервных цепях, участвующих в чтении: томографическое исследование мозга показало снижение количества белого вещества в этих трактах. Считается, что аномалии белого вещества отражают как дефекты миелинизации нервных волокон, так и нарушения процесса формирования нейронов, образующих данные волокна.

Неспособность различать высоту звука обусловлена нарушениями в высокоуровневой обработке слуховой информации в коре больших полушарий. Психолог Кристи Хайд (Kristi L. Hyde) из Университета МакГилла обнаружил, что у таких людей снижено количество белого вещества в одном конкретном пучке волокон на правой стороне мозга. Более того, новое исследование Лесли Джекобсена (Leslie K. Jacobsen) из Йельского университета показывает, что воздействие табачного дыма на поздних стадиях развития плода и в подростковом возрасте, когда происходит миелинизация, негативно влияет на белое вещество. По данным ДТ-МРТ, его структура непосредственно коррелирует с результатами тестирования слуха. Известно, что никотин влияет на рецепторы олигодендроцитов, регулирующих развитие этих клеток. Воздействие определенных факторов внешней среды в критические периоды миелинизации может оставить последствия на всю жизнь.

В настоящее время причиной шизофрении считают аномалии развития мозга, в том числе нарушение образования связей. Врачи всегда удивлялись, почему это заболевание обычно развивается в подростковом возрасте. Но ведь это как раз тот возраст, когда идет активная миелинизация передней части больших полушарий! За последние годы исследователи обнаружили аномалии белого вещества в нескольких областях мозга больных шизофренией — оказалось, что в нем снижено количество олигодендроцитов. А когда недавно стали доступны так называемые «генные чипы» — миниатюрные диагностические приспособления, способные одновременно определять

тысячи генов, — исследователи были поражены, обнаружив, что многие из мутировавших генов, связанных с шизофренией, участвуют в формировании миелина. Аномалии белого вещества также выявлены у больных, страдающих синдромом дефицита внимания и гиперактивности, биполярным расстройством, нарушениями речи, аутизмом, возрастными нарушениями функций мозга и болезнью Альцгеймера, а также даже у людей с патологической склонностью ко лжи.

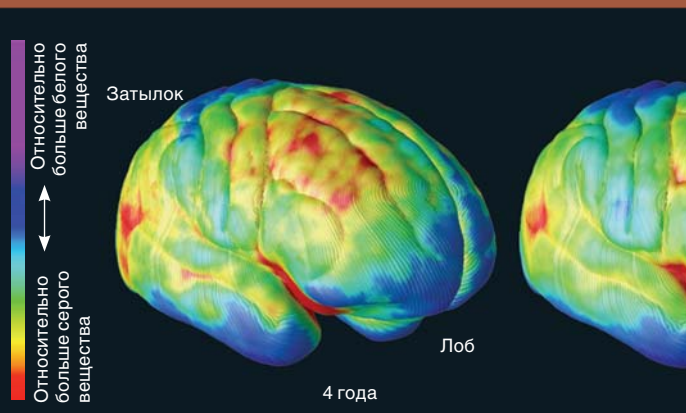
Недоразвитие или истонченность миелина может быть следствием, а не причиной плохой передачи сигналов между нейронами. В конце концов, когнитивные функции действительно реализуются благодаря коммуникации между нейронами через синапсы в сером веществе мозга, и именно там оказывают свое действие большинство психотропных препаратов. Однако оптимальная коммуникация между областями мозга, являющаяся основой адекватных мыслительных процессов, зависит от белого вещества, соединяющего эти области. В 2007 г. Габриел Корфас (Gabriel Corfas), невролог из Детского госпиталя в Бостоне, показал, что экспериментальное воздействие именно на гены олигодендроцитов (а не на гены нейронов) вызывает у мышей разительные перемены в поведении, напоминающие шизофрению. При этом на поведение влияет один из генов, упоминавшихся выше, а именно нейрорегулин, который оказывается аномальным в биопсических пробах мозга больных шизофренией.



У профессиональных пианистов белое вещество в некоторых областях мозга развито сильнее, чем у людей, не имеющих отношения к музыке. Это говорит о том, что на него влияет обучение. Более того, белое вещество более развито у тех пианистов, которые начали регулярно заниматься музыкой до 11 лет, в сравнении с теми, кто приступил к занятиям позже, что указывает на существование критических периодов для возможности приобретения навыков на высоком уровне

РАЗВИТИЕ. МОЗГ СОЗРЕВАЕТ

При рождении лишь малая часть аксонов покрыта миелином. Со временем все больше волокон приобретают изоляцию, и процесс распространяется от затылочной коры к лобной. На представленных изображениях, выполненных Полем Томпсоном (Paul Thompson) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, показано формирование нервных связей и соответствующее ему увеличение количества миелина. Миелинизация областей, отвечающих за такие базовые функции, как зрение (затылочная область), завершается к четырехлетнему возрасту, далее идут речевые центры, а последними — области, ответственные за самоконтроль (лобная доля)



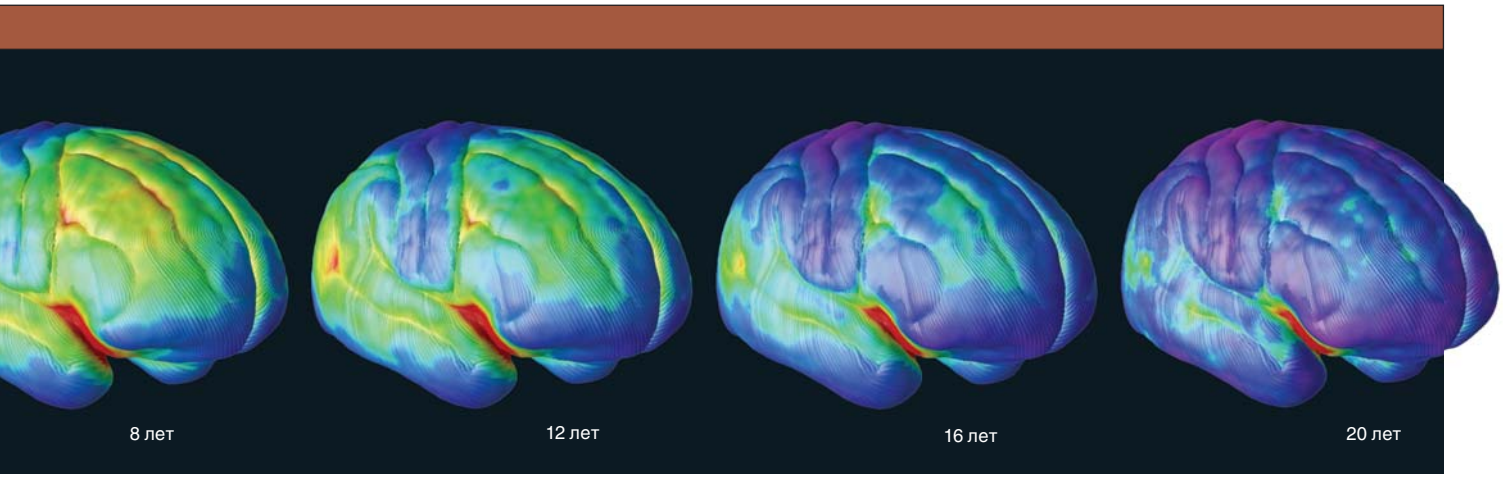
Переделать старость

Каков бы ни был механизм данного явления, при созревании нашего мозга точность связей между его областями повышается. От того, насколько хорошо построены связи, может зависеть наша способность в определенном возрасте осваивать различные навыки.

Исследование Уллена, проведенное среди профессиональных пианистов, также показало, что белое вещество было развито сильнее у музыкантов, начавших осваивать инструмент в более раннем возрасте. А у людей, которые научились играть, уже став взрослыми, его развитие было усилено лишь в передней части мозга — там, где миелинизация еще не была завершена.

Это открытие говорит о том, что процесс формирования изоляции вокруг нервных волокон отчасти задает временные пределы для освоения новых навыков — так называемые критические периоды, в течение которых возможен определенный вид обучения. Изучая иностранный язык в зрелом возрасте, вы не сможете избавиться от акцента, однако если вы осваиваете язык с детства, то сможете говорить на нем как на родном. Различие состоит в том, что соединения в мозге образуются в соответствии с тем, какие звуки мы слышим, будучи детьми. Мы буквально теряем связи, которые позволили бы нам слышать звуки, встречающиеся только в иностранных языках. С точки зрения эволюционного развития очевидно, что нет никакого смысла сохранять в мозге связи для восприятия звуков, которые человек никогда не слышал. Наличием критических периодов также в значительной степени объясняется то, что восстановление после мозговых травм протекает у взрослых не так гладко, как у детей.

INTI ST. CLAIR Getty Images



PAUL THOMPSON U.C.L.A. (gray matter scans)

Специалисты выявили специфические белковые молекулы миелина, предотвращающие рост аксона и образование новых связей. Мартин Шваб (Martin E. Schwab), исследователь мозга из Цюрихского университета, открыл первый белок из группы особых белков миелина, которые при контакте с отростками аксона немедленно губят их. Если нейтрализовать данный белок, который Шваб назвал *Nogo* (теперь он называется *Nogo-A*), у животных происходит восстановление связей на месте травмы спинного мозга: у них вновь появляются чувствительность и способность к движению. Недавно Стивен Стриттметтер (Stephen M. Strittmatter) из Йельского университета обнаружил, что критические периоды для образования связей в мозге можно «запустить» заново, если заблокировать сигналы от *Nogo*. Если нарушить работу этого белка у старых мышей, то мозг грызунов приобретет способность устанавливать новые связи в зрительной системе.

Если миелинизация завершается, когда человеку исполняется 20 лет, то не противоречит ли это высказанным недавно предположениям, что мозг остается пластичным даже в среднем и старшем возрасте? Например, исследования показали, что умственная нагрузка помогает отсрочить наступление болезни Альцгеймера у человека в возрасте за 60, 70 и даже за 80 лет. Проведены эксперименты, выявившие, что миелинизация продолжается до 55 лет, хотя и в значительно более скромных масштабах.

Можно с определенностью сказать, что белое вещество играет ключевую роль в таких видах обучения, которые требуют длительной практики и многократных повторений, а также обширной интеграции удаленных друг от друга областей коры больших полушарий. У детей процесс миелинизации идет интенсивно, и им намного легче осваивать новые навыки, чем их дедушкам и бабушкам. Если человек хочет достичь высшего уровня — как в интеллектуальной, так и спортивной сферах, — то он должен начать обучение в раннем возрасте. Мы сами по мере взросления «строим» свой мозг путем взаимодействия с внешней средой. Мы можем поразному использовать приобретенные способности, однако уже никогда не сможем стать пианистами с мировым именем, чемпионами мира по шахматам или мастерами спорта по теннису, если не начали обучаться этому в детстве.

Разумеется, пожилые люди тоже могут учиться, но им доступен другой вид обучения, затрагивающий только синапсы. Однако интенсивные занятия заставляют нейроны разряжаться, и появляется возможность того, что нейронный разряд будет стимулировать миелинизацию. Возможно, когда-нибудь, когда мы полностью поймем, в какой период и каким образом формируется белое вещество, мы сможем создать средства, позволяющие изменять его даже у людей старшего возраста. Чтобы мечта стала реальностью, необходимо найти тот сигнал, который приказывает олигодендроцитам миелинизировать один аксон и не делать этого с соседним. Бесценное знание сокрыто глубоко под слоем серого вещества, но в будущем исследователям обязательно удастся его добыть. ■

Перевод: Б.В. Чернышев

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Myelination: An Overlooked Mechanism of Synaptic Plasticity? R. Douglas Fields in Neuroscientist, Vol. 11, No. 5, pages 528–531; 2005.
- Extensive Piano Practicing Has Regionally Specific Effects on White Matter Development. Sara L. Bengtsson et al. in Nature Neuroscience, Vol. 8, No. 9, pages 1148–1150; September 2005.
- Astrocytes Promote Myelination in Response to Electrical Impulses. T. Ishibashi et al. in Neuron, Vol. 49, No. 6, pages 823–832; March 16, 2006.
- How to Grow a Super Athlete. D. Coyle in Play Magazine, (New York Times Sports) March 4, 2007. Доступно на сайте www.nytimes.com/2007/03/04/sports/playmagazine/ 04play-talent.html