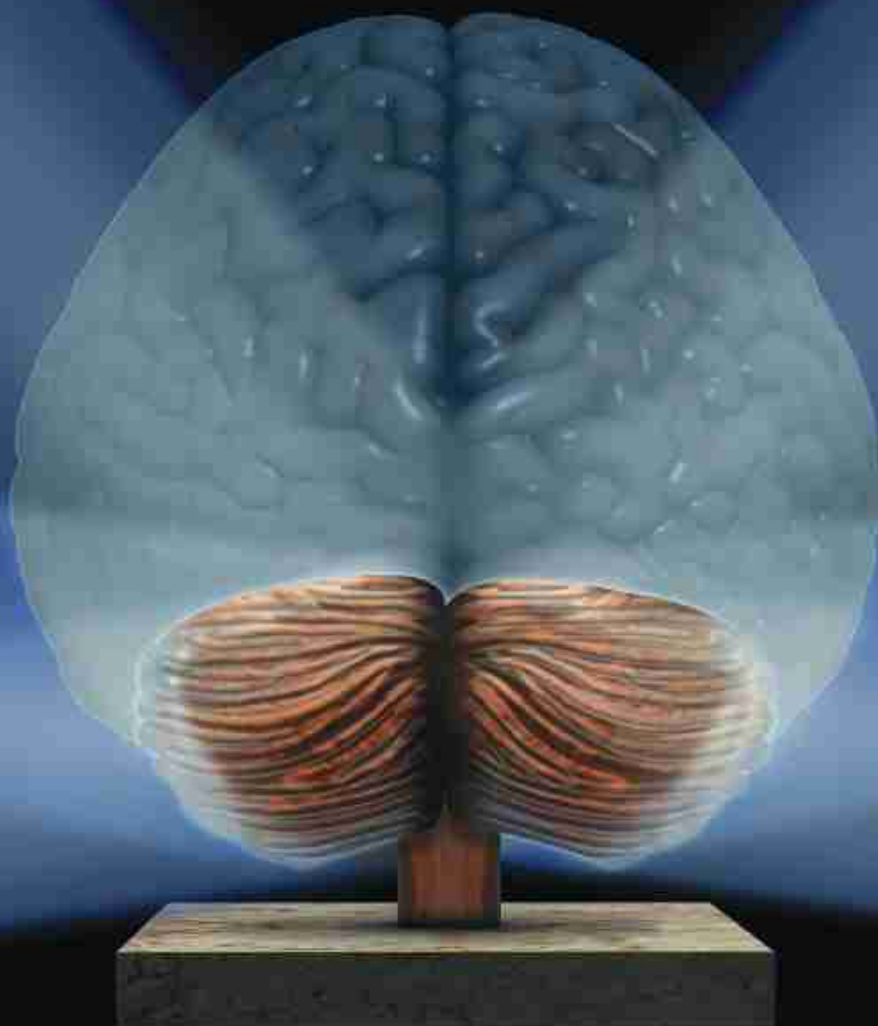


ЭТОТ ЗАГАДОЧНЫЙ МОЗЖЕЧОК

Джеймс Бауэр и Лоренс Парсонс



Долгое время мозжечок считался структурой, ответственной за координацию движений. Сегодня ученые все чаще говорят о его участии в процессах восприятия и когнитивной деятельности.

«В задней части головного мозга человека над варолиевым мостом и под затылочными долями больших полушарий расположена структура размером с бейсбольный мяч, напоминающая по форме боб. Называется она мозжечок.»

Таким довольно непритязательным вступлением начиналась статья о мозжечке, опубликованная в 1958 г. в *Scientific American*. В ней говорилось: «В отличие от большого мозга, в котором ученые обнаружили многочисленные центры самых разнообразных форм психической деятельности, мозжечок и по сей день остается структурой «за семью печатями»: о его функциях нам почти ничего не известно». Однако через 17 лет в журнале появился другой материал, где автор писал: «Сегодня нет никаких сомнений в том, что мозжечок – центральная структура головного мозга, ответственная за организацию движений».

Совсем недавно мозжечок вновь стал предметом горячих научных споров. Так, нейробиологи, изучающие когнитивные функции головного мозга, обнаружили, что у людей эта структура сохраняет высокую активность во время разнообразных форм деятельности, не связанных непосредственно с движениями. С помощью хитроумных тестов было установлено, что повреждение отдельных областей мозжечка нередко сопровождается неожиданным ухудшением процессов, никак не связанных с моторикой (например, снижением скорости и точности восприятия сенсорной информации). Другие исследования показали, что эта мозговая структура играет важную роль в процессах краткосрочной памяти, внимания, эмоциях, когнитивной деятельности, планировании действий и даже в развитии таких патологических состояний, как шизофрения и аутизм. Дан-

ные нейробиологических исследований, в ходе которых изучались как паттерны сенсорных входов в мозжечок, так и способы переработки им информации, также указывают на то, что пришло время переосмыслить функции этого отдела головного мозга. И вновь мозжечок стал «структурой за семью печатями».

В том, что мозжечок – нечто большее, нежели центр управления движениями, нет ничего удивительного. На это указывают его крупные габариты и сложная нейронная организация. Размерами он уступает только коре больших полушарий – главному регулятору и координатору всех функций человеческого организма. Поверхность мозжечка покрыта складками – бороздами и извилинами, благодаря чему в сравнительно небольшом объеме мозговой ткани «упаковано» невообразимое количество нейронных цепей.

О важных функциях этой структуры свидетельствует и ее укрупнение в процессе эволюции. Судя по строению и размерам ископаемых черепов, за последний миллион лет мозжечок человека увеличился по меньшей мере в три раза! Но, пожалуй, самое удивительное то, что количество нервных клеток (нейронов) в нем больше, чем во всех остальных отделах головного мозга вместе взятых. Кроме того, более чем за 400 млн. лет эволюции звончатых животных характер соединения этих клеток друг с другом почти не претерпел каких-либо изменений (см. стр. 41). В мозжечке акулы нейроны организованы в нервные цепочки почти так же, как и у человека.

Не только моторика

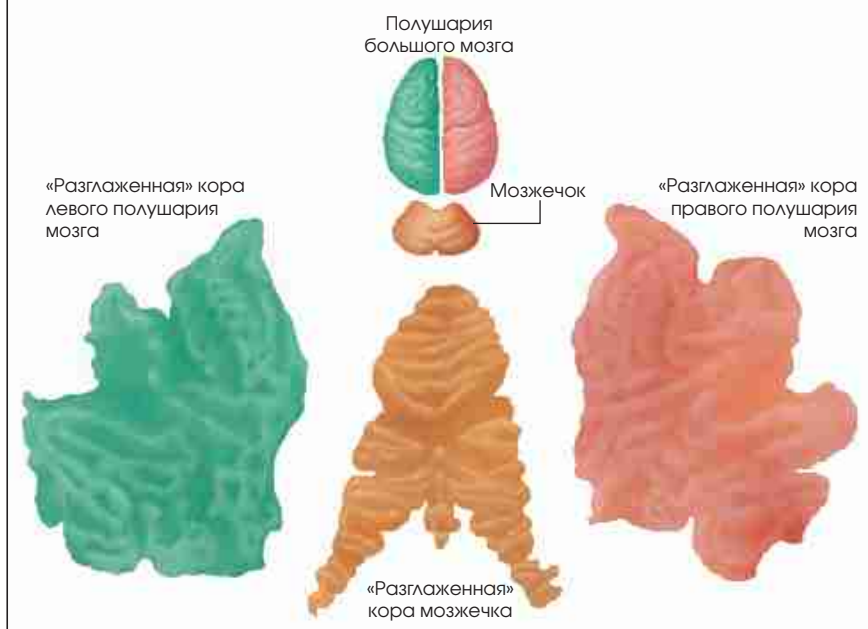
Гипотеза об участии мозжечка в управлении движениями впервые была высказана в середине XIX века физиологами-клиницистами, обнаружившими, что удаление этой структуры нередко приводит к серьезным нарушениям координации. Во время Первой мировой войны английский невропатолог Гордон Холмс подробно описал разнообразные формы расстройств двигательной координации у солдат с огнестрельными ранениями в области мозжечка.

За последние 15 лет, когда ученые взяли на вооружение более совершенные методы тестирования, ситуация снова осложнилась. В 1989 г. Ричард Иври (Richard B. Ivry) и Стивен Кил (Steven W. Keel) из Орегонского университета обнаружили, что люди с поврежденным мозжечком не способны точно оценивать продолжительность звуков или пауз между ними. А в начале 1990-х гг. Джули Файез (Julie A. Fiez) из Вашингтонского университета установила, что такие больные чаще совершают ошиб-



КОРА МОЗЖЕЧКА И БОЛЬШИХ ПОЛУШАРИЙ

В «разглаженном» виде кора (наружный слой) человеческого мозжечка имеет такую же площадь поверхности, как «расправленная» кора одного большого полушария мозга. Крупные размеры и сложная нейрональная организация мозжечка указывают на то, что эта структура выполняет очень важные функции.



ки при выполнении вербальных заданий. Например, одному из пациентов потребовалось дополнительное время, чтобы при виде ножа вспомнить соответствующий глагол – «резать».

Несколько позднее авторы этой статьи установили, что люди с мозжечковой дегенерацией менее точно различают высоту двух предъявляемых

звуков. А Петер Тир (Peter Thier) из Тюбингенского университета в Германии показал, что такие больные чаще, чем здоровые испытуемые, совершают ошибки в тестах, где требуется оценка скорости и направления движения различных объектов.

Повреждение мозжечка приводит не только к нарушению переработки зри-

тельной, слуховой и речевой информации, но и сказывается на эмоциональном поведении: пациенты (и взрослые, и дети) не способны контролировать свои эмоции, в отличие от большинства людей, они слишком вяло или слишком бурно реагируют на раздражители. Некоторые ученые связывают повреждение мозжечка с дислексией (неспособностью к чтению). Недавние исследования показали, что мозжечок принимает участие в процессах памяти, внимания, психической деятельности, планировании действий и управлении человеком собственными побуждениями. Так, например, в 1992 г. Джордан Графман (Jordan Grafman) из Национального института здравоохранения обнаружил, что пациенты с атрофированным мозжечком испытывали серьезные трудности при планировании действий, необходимых для выполнения теста «ханойской башни», где нужно в соответствии с определенными правилами нанизывать на стержень кольца различного диаметра.

В исследованиях, проведенных с помощью магнито-резонансной томографии, была выявлена активация мозжечка у здоровых испытуемых, когда их просили вспомнить список букв, прочитанный им несколькими минутами ранее, или пытавшихся подыскать эквивалент тому или иному зрительному образу. С помощью этой методики было обнаружено, что у гиперактивных детей с дефицитом внимания (у которых нарушена способность управлять собственными побуждениями) размеры мозжечка меньше, чем у нормальных. И, наконец, томографическое исследование мозга здоровых людей и животных выявило высокую активность мозжечка во время восприятия звуков и запахов, а также когда им хотелось пить, есть или они испытывали недостаток воздуха или боль.

Мозжечок и прикосновения

Новые данные нельзя объяснить традиционными представлениями о мозжечке как о центре моторного контроля. Мы пришли к такому выводу, ▶

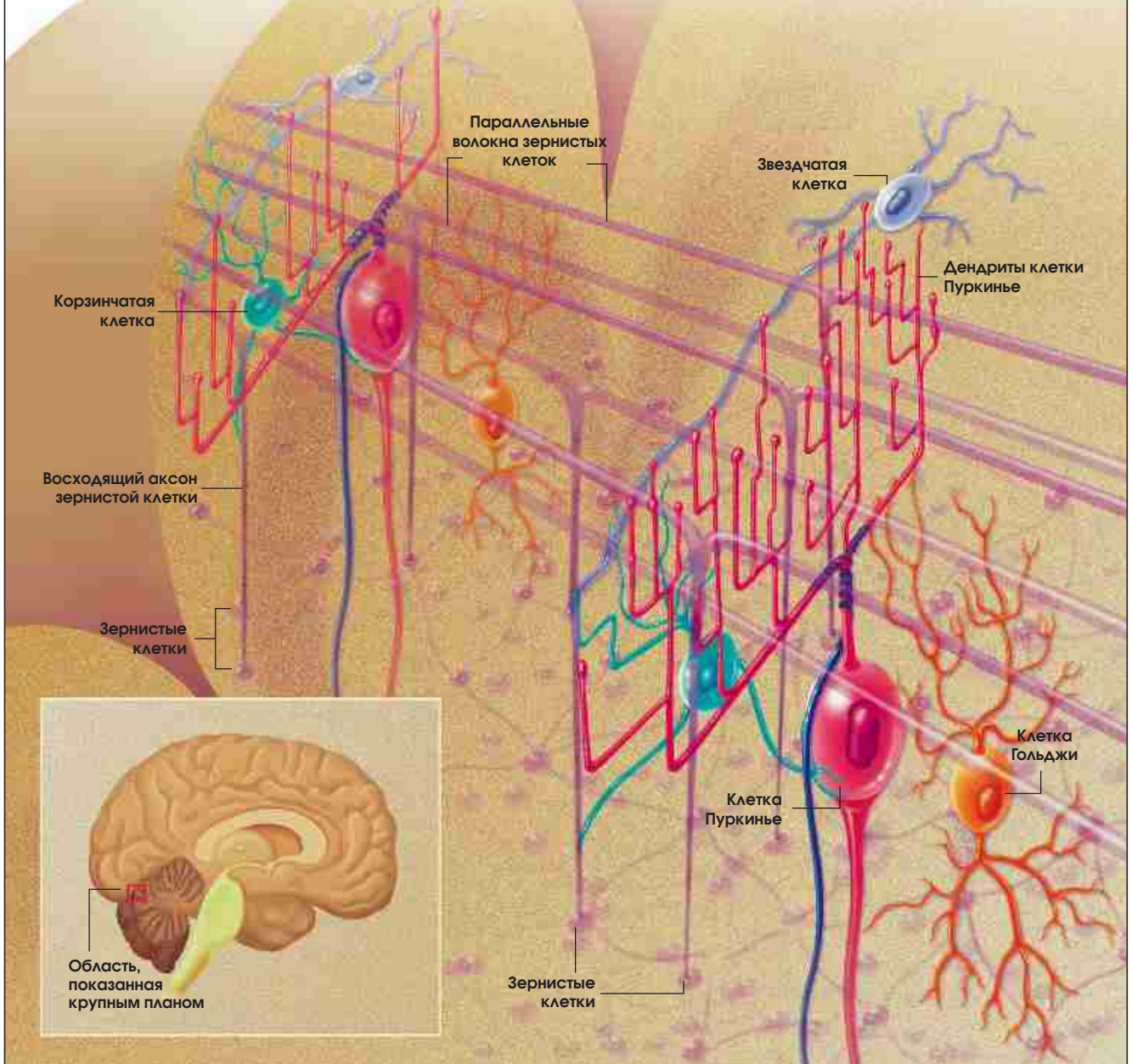
ОБЗОР: МОЗЖЕЧОК

- Мозжечок расположен в задней части головного мозга и отличается сложной нейрональной организацией, не претерпевшей в процессе эволюции позвоночных никаких изменений.
- Традиционные представления о мозжечке как о мозговом центре управления движениями подвергаются сегодня сомнению. Результаты исследований, выявивших высокую активность мозжечка при выполнении испытуемыми широкого спектра заданий, указывают на то, что функции этой структуры больше связаны с координацией сенсорного входа, чем моторного выхода.
- Удаление мозжечка в молодом возрасте сопровождается появлением лишь немногочисленных поведенческих расстройств. Полученные данные позволяют предположить, что функции этой структуры могут брать на себя другие отделы головного мозга.

МЕЖНЕЙРОННЫЕ СОЕДИНЕНИЯ В МОЗЖЕКЕ

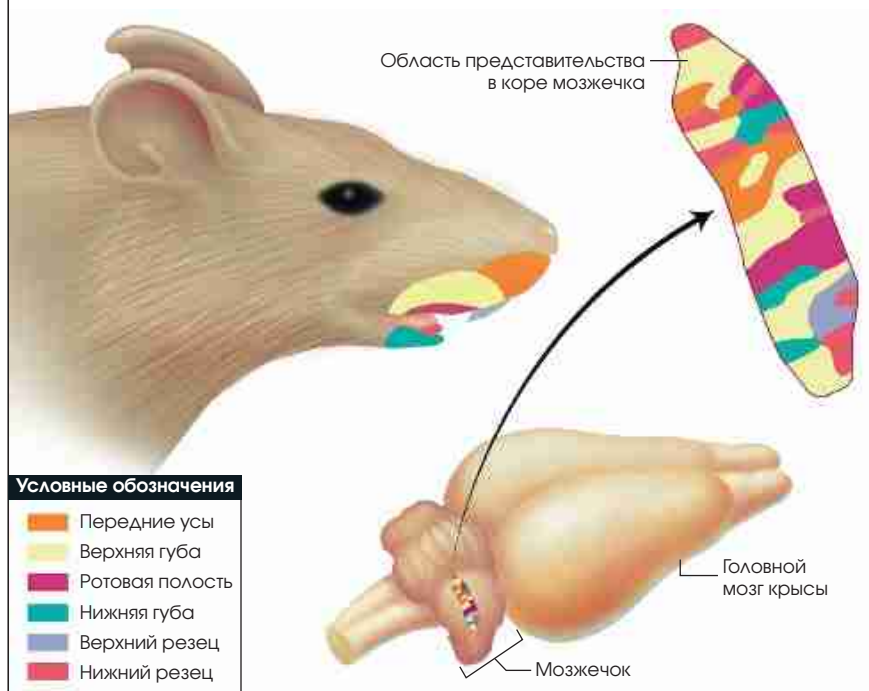
Основные принципы организации нейронных связей в мозжечке стали известны в конце XIX в. благодаря фундаментальным исследованиям испанского гистолога Сантьяго Рамон-и-Кахаля (Santiago Ramon y Cajal). Главный структурный элемент коры малого мозга – клетки Пуркинье, получившие свое название в честь описавшего их в 1837 г. чешского физиолога Яна Пуркинье (Johannes Purkinje). Эти нейроны – одни из самых крупных клеток в нервной системе позвоночных; каждая клетка Пуркинье имеет 150–200 тыс. входов (синапсов) от других нервных клеток. Основная часть контактов образована волокнами одних из самых маленьких нейронов позвоночных – мозжечковыми зернистыми клетками, которые упакованы необычайно плотно

(на 1 кв. мм ткани приходится 6 млн. клеток) и являются самым многочисленным типом нейронов в головном мозге. Длинные отростки (аксоны) зернистых клеток направляются вверх к поверхности коры мозжечка, ветвятся и создают здесь параллельные волокна, образующие многочисленные контакты (синапсы) с короткими отростками (дендритами) клеток Пуркинье и с дендритами трех других типов нейронов мозжечка – звездчатых, корзинчатых клеток и клеток Гольджи, которые модулируют сигналы, генерируемые зернистыми клетками и клетками Пуркинье. Единственным выходом из коры мозжечка являются аксоны клеток Пуркинье. Такая организация связей в общих чертах характерна для мозжечка всех позвоночных животных.



МОЗАИЧНАЯ ТОПОГРАФИЯ МОЗЖЕЧКА

Отдельные области морды крысы не имеют в мозжечке «собственного» представительства. Когда ученые прикасаются к верхней губе животного, они могут зарегистрировать усиление электрической активности сразу в нескольких разобренных областях коры мозжечка. Благодаря такой мозаичной топографической организации коры мозжечка способен интегрировать самую разнообразную сенсорную информацию, поступающую к нему от разных областей тела в то время, когда животное исследует окружающую среду.



изучая активность различных областей этой структуры в ответ на прикосновения к тем или иным участкам тела. Автор этой статьи Джеймс Бауэр начал проводить подобные исследования более 20 лет назад. Он регист-

рировал электрическую активность небольших ансамблей нейронов в головном мозге крыс в ответ на легкие касания различных участков их тела. Тактильная стимуляция приводила к активации нейронов в обширной об-

ласти мозжечка (см. иллюстрацию слева), носившей, однако, мозаичный характер. Соседние области мозжечка могли получать сенсорные сигналы от участков кожи, расположенных в разных частях тела, а стимуляция соседних зон могла активировать далеко отстоящие друг от друга области мозжечка. Еще более удивительным оказался тот факт, что мозжечок крысы получает сенсорные сигналы (входы) главным образом от морды. Это открытие привело Бауэра в полное замешательство: ведь ранее считалось, что большая часть «тактильной области» мозжечка кошки получает вход от передних лап животного, а у обезьян она активизируется при прикосновениях к пальцам передних конечностей.

Сенсорный координатор

У исследователей возник правомерный вопрос: что общего между мордой крысы, передними лапами кошки и пальцами рук обезьяны? Ответ, казалось бы, очевиден: эти части тела позволяют им наиболее эффективно исследовать окружающий мир с помощью осязания. Те, у кого есть кошка, прекрасно знают, какими нежными и коварными бывают ее лапы. Известно также, что крысы познают окружающий мир и защищаются от врагов главным образом с помощью морды и рта. «Мозаичная» топография тактильных областей мозжечка подтверждает предположение, что эта структура принимает участие в сравнении сенсорных данных, поступающих от многочисленных участков тела и помогающих животному исследовать окружающий мир. Похоже, «тактильная топография» мозжечка определяется функциональной значимостью тех или иных участков тела в жизни животного, а не их расположением на его теле. Гипотеза о том, что в мозжечке крысы происходит сличение сенсорной информации, поступающей от различных частей морды, нашло дополнительное подтверждение и в экспериментах, где изучались реакции мозжечка на стимуляции этих входов. В результате

ОБ АВТОРАХ:

Джеймс Бауэр (James M. Bower) и **Лоренс Парсонс** (Lawrence M. Parsons) – сотрудники Центра томографических исследований при Техасском университете в Сан-Антонио. Бауэр – профессор компьютерной нейробиологии этого центра и Центра нейробиологии им. Кахалы при Техасском университете в Сан-Антонио, основатель журнала *Journal of Computational Neuroscience* и организатор международного ежегодного съезда компьютерных нейробиологов. Парсонс, профессор когнитивной нейробиологии Центра томографических исследований, член редколлегии журнала *Human Brain Mapping* и совета Международного фонда музыкальных исследований, занимается разработкой программ по развитию когнитивной нейробиологии в Национальном научном фонде США.

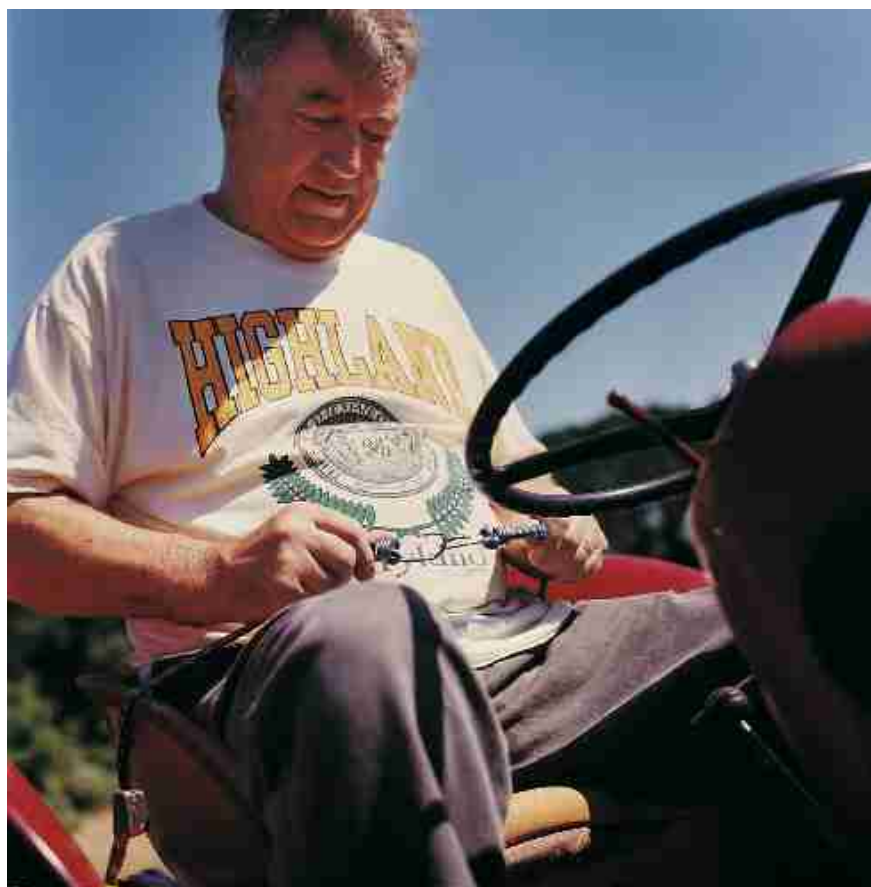
родилось новое предположение о функциях мозжечка как структуры, координирующей процесс сбора сенсорных данных головным мозгом.

Нами было проведено исследование, в котором сравнивалась активность мозжечка в двух экспериментальных ситуациях – когда испытуемые должны были различать на ощупь неболь-

шие предметы и когда они просто должны были брать и выпускать их из рук. В соответствии с традиционными теориями тонкий моторный контроль, связанный с движением пальцев при манипуляциях с маленькими предметами, неизбежно должен был приводить к сильной активации тактильной области мозжечка. Однако

при выполнении пациентами этих действий активность тактильной области на самом деле была очень низкой. Зато в первом задании, связанном с ощупыванием предметов, мы выявили значительную активацию мозжечка. Таким образом, результаты нашего эксперимента еще раз подтверждают предположение, что он участвует ско-

Мозжечок участвует скорее в переработке сенсорных данных, нежели информации, связанной исключительно с двигательными функциями.



Рудольф Вант-Хофф из графства Говард страдает поражением мозжечка вследствие спиноцеребеллярной атрофии – редкой наследственной болезни. Заболевание сопровождается нарушением равновесия, координации движений и речи, а также пониженной способностью к различению некоторых звуков. Сидя в кабине своего трактора, он стабилизирует положение тела с помощью пристегнутого ремня.

рее в переработке сенсорной, нежели моторной информации и что особенно высокую активность он проявляет во время сбора головным мозгом сенсорных данных.

Жизнь без мозжечка

Гипотеза об участии мозжечка в сенсорной деятельности мозга – всего лишь одна из нескольких теорий, не ограничивающих функции этой структуры участием в процессах моторного контроля. Так, Р. Иври выдвигает гипотезу «генерализованного хронометража», согласно которой мозжечок контролирует продолжительность телодвижений, что позволяет человеку оценивать длительность сенсорных стимулов (зрительных, слуховых и т.д.).

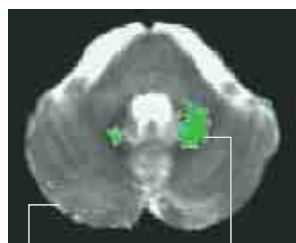
По мнению других ученых, мозжечок не только облегчает совершение точных движений, но и «сглаживает» переработку информации, связанную с настроениями и мыслями человека. Впервые это предположение высказал в 1991 г. Джереми Шмаманн (Jeremy D. Schmahmann) из Массачусетского госпиталя общего профиля, а в 1996 г. Нэнси Андерсон (Nancy S. Anderson) из Айовского университета использовала его для объяснения шизофрении. Она допустила, что нарушение функций мозжечка – непо- ▶

ИЗУЧЕНИЕ ФУНКЦИЙ МОЗЖЕЧКА

Роль мозжечка в процессах координации движений и интеграции сенсорного входа изучалась нами в специально спланированном эксперименте. Активность этой структуры у 6 здоровых испытуемых оценивалась с помощью магнито-резонансной томографии. В первой части исследования мы неподвижно фиксировали кисти испытуемых и осторожно проводили по кончикам их пальцев кусочками наждачной бумаги (a). В некоторых случаях они просили сравнить шероховатость двух типов шкурки (b). Обе процедуры носили чисто сенсорный характер, но в последнем случае каждому участнику нужно было различить тип воздействующего на его пальца тактильного стимула.

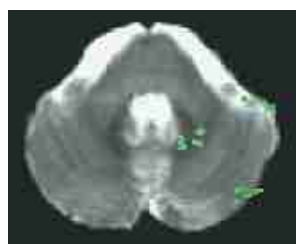
Во второй части опыта испытуемый помещал каждую руку в мешок с маленькими деревянными предметами различной формы и текстуры. В первом задании (c) он должен был захватывать пальцами и выпускать случайно попадающиеся предметы, не обращая внимания на их форму. Во втором задании (d) участников просили сравнивать форму и текстуру предметов, оказавшихся в разных руках. При выполнении задания (c) активность мозжечка испытуемых была очень низкой. Наиболее высокий уровень активности этой структуры отмечался в том случае, когда они должны были оценивать свои ощущения – независимо от того, подвижны (a) или неподвижны (b) были при этом кисти рук. Результаты эксперимента указывают на то, что функции мозжечка связаны скорее с переработкой сенсорной информации, чем с управлением движениями.

ПАССИВНОЕ ВОСПРИЯТИЕ Движение отсутствует

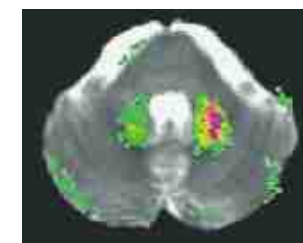
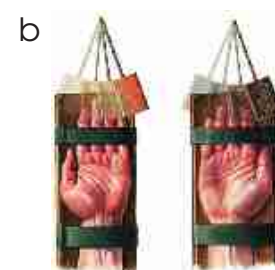


Мозжечок Активная область

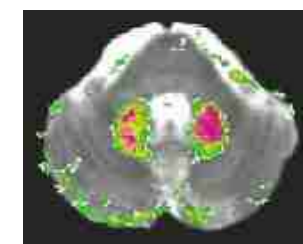
Движение



АКТИВНОЕ СЕНСОРНОЕ СРАВНЕНИЕ Движение отсутствует



Движение



средственная причина характерного для шизофрении расстройства психики.

По мере того как исследователи выявляют все больше факторов, вызывающих изменение активности мозжечка, ему приписываются все более разнообразные функции. Но ни один уче-

ный пока не объяснил, каким образом одна-единственная структура мозга, в которой организация нервных цепей отличается поразительным единообразием, способна выполнять столь многообразные функции и нести ответственность за столь различные аспекты поведения. Ученых сбивает

с толку способность людей восстанавливаться после повреждения мозжечка. Хотя его полное удаление поначалу и приводит к нарушению координации движений, по прошествии некоторого времени у пациентов (особенно молодых) двигательные функции возобновляются. Необычай-

но высокая пластичность – одна из характерных особенностей головного мозга, но если подобным повреждением подвергаются сенсорные или сенсомоторные области коры больших полушарий, как правило, происходит серьезное и необратимое ухудшение соответствующих функций.

Учитывая это обстоятельство, некоторые ученые шутят, что главная функция мозжечка – компенсировать собственное отсутствие. Непохоже, однако, чтобы у столь крупной и сложно устроенной структуры мозга не было какого бы то ни было назначения и она представляла собой рудиментарный орган. Скорее всего, дело обстоит как раз наоборот: функции мозжечка настолько важны, что его отсутствие в значительной мере приходится ком-

изменений в положении пальцев человеческой руки, осязающей предмет, или усов крысы, обследующей поверхность. Можно полагать, что, функционируя в качестве поддерживающей структуры, мозжечок обнаруживает определенный уровень активности в очень широком спектре условий – особенно в ситуациях, требующих тщательного контроля поступающих в мозг и запоминаемых сенсорных данных. При повреждении же или удалении мозжечка нарушенную функцию сенсорной координации обычно компенсируют другие системы мозга, использующие альтернативные стратегии переработки информации.

Как показывают исследования двигательной координации у людей с по-

током сенсорной информации способны компенсировать другие мозговые структуры, то непрерывный дефектный контроль чреват неправильным функционированием других отделов мозга, пытающихся использовать «некачественные» сенсорные данные. Этим можно объяснить результаты исследований, указывающие на участие мозжечка в развитии таких расстройств, как аутизм, при котором человек вообще не реагирует на поступающую в мозг сенсорную информацию.

Если главное предназначение мозжечка – поддержание деятельности остальных отделов головного мозга, тогда он не принимает непосредственного участия в процессах двигательной координации, памяти, вос-

Очевидно, что представления о мозжечке и деятельности мозга в целом вскоре претерпят радикальные изменения.

пенсировать остальным отделам головного мозга.

Для объяснения загадочного феномена восстановления мозжечковых функций было выдвинуто несколько теорий. В соответствии с предложенной нами гипотезой сенсорной координации мы полагаем, что мозжечок не связан с какими-либо определенными формами поведения или психологическими процессами. Скорее он функционирует как некая поддерживающая структура, обеспечивающая нормальную работу остального мозга. Эта поддержка включает отслеживание приходящих в мозг сенсорных данных и непрерывную и необычайно сложную регулировку поступления этой информации, благодаря чему обеспечивается максимально высокое качество сенсорного входа.

Мы предполагаем, что эта регулировка принимает форму тончайших

врежденным мозжечком, первое время их движения медленные и «упрощенные» – вполне оправданная стратегия мозга, компенсирующая отсутствие высококачественного сенсорного входа. Это означает, что функционирование поврежденного мозжечка может иметь для моторики человека более серьезные последствия, чем его полное отсутствие. Ведь если полное отсутствие контроля за

приятия и многих других феноменов, с которыми исследователи пытаются связать его функции. Хотя предложенная нами теория – всего лишь одна из многочисленных попыток дать объяснение новым удивительным данным о работе мозжечка, совершенно очевидно, что наши представления об этой структуре и деятельности головного мозга в целом в ближайшее время должны радикально измениться. ■

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА:

- The Role of the Cerebellum in Motor Control and Perception. Michael G. Paulin in *Brain Behavior and Evolution*, Vol. 41, pages 39–50; February 1993.
- The Cerebellum and Cognition. Edited by Jeremy D. Schmahmann. Academic Press, 1997.
- Cerebellar Contributions to Cognition and Imagery. Richard B. Ivry and Julie A. Fiez in *New Cognitive Neurosciences*. Edited by Michael S. Gazzaniga. MIT Press, 2000.
- The Cerebellum: Recent Developments in Cerebellar Research. Edited by Stephen M. Highstein and W. Thomas Thatch. New York Academy of Sciences, 2002.