

Маркус Райхл

ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ МОЗГА

Активность мозга в те моменты, когда человек бездействует или грезит наяву, может стать ключом к пониманию природы неврологических заболеваний и даже самого феномена сознания

Представьте, что вы отдыхаете, сидя в шезлонге, на коленях у вас лежит журнал. Внезапно вам на руку садится муха. Вы хватаете журнал и пытаетесь прихлопнуть насекомое. Что происходило в вашем мозге после того, как появилась муха? А что творилось до ее появления? Многие нейрофизиологи длительное время полагали, что когда человек расслаблен и наполовину дремлет, активность его мозга также подавлена. С этой точки зрения деятельность отдыхающего мозга представляет собой что-то вроде «снега» на экране телевизора, когда нет сигнала от телевизионной станции. Когда муха садится вам на руку, мозг сосредоточивается на осознанной задаче — избавиться от насекомого. Но недавние эксперименты с применением методов томографии выявили нечто удивительное: когда человек расслаблен и бездействует, кипучая деятельность в его мозге не прекращается.

Оказывается, когда разум находится в покое — если вы, например, мечтаете, удобно устроившись в кресле, спите или находитесь под действием наркоза, — различные области мозга активно взаимодействуют друг с другом. И на такую передачу сигналов, известную как пассивный режим работы мозга, затрачивается энергии приблизительно в 20 раз больше, чем необходимо для осознанной реакции на любой внешний стимул. Действительно, большинство поступков мы совершаем осознанно — и когда садимся обедать, и когда произносим речь, — и при этом происходит отклонение от фоновой активности пассивного режима работы мозга.

Ключом к пониманию пассивного режима работы мозга стало открытие прежде неизвестной системы мозга, получившей название «сеть пассивного режима работы мозга» (СПРРМ). Точную роль СПРРМ в организации нервной деятельности еще продолжают изучать, но, возможно, именно она управляет системой формирования воспоминаний и различными другими систе-

мами, которые требуют подготовки к будущим событиям. Например, двигательная система мозга должна быть приведена в «состояние боевой готовности» к тому моменту, когда вы почувствуете муху на вашей руке. СПРРМ может играть решающую роль в синхронизации работы всех отделов мозга для того, чтобы они, как спортсмены на соревнованиях, были готовы начать гонку, как только раздастся выстрел стартового пистолета. Если эта система действительно готовит мозг к сознательной деятельности, изучение ее работы может помочь сделать решающие шаги к постижению природы сознания. Кроме того, нейрофизиологи полагают, что сбои в работе СПРРМ могут быть причиной психических расстройств и целого ряда других заболеваний мозга, от депрессии до болезни Альцгеймера.

Исследование темной энергии

Идея о том, что мозг постоянно работает, не нова. Первым ее высказал Ханс Бергер (Hans Berger), изобретатель метода электроэнцефалографии, позволяющего регистрировать электрическую активность мозга, изображая ее в виде волнистых линий на графиках. В 1929 г. Бергер опубликовал результаты своего исследования непрерывных электрических колебаний, выявленных при помощи электроэнцефалографа, и отметил, что «центральная нервная система активна всегда, а не только во время бодрствования».

Но его идеи не получили должного внимания даже после того, как во всех нейрофизиологических лабораториях стали широко применяться неинвазивные методы томографии. Сначала в конце 1970-х гг. появился

метод позитронно-эмиссионной томографии (ПЭТ), позволяющий измерять уровень метаболизма (содержание глюкозы и активность кровотока) в качестве косвенных показателей степени активности нейронов. Затем в 1992 г. пришло время метода функционального магнитного резонанса (фМРТ), который дает возможность отслеживать снабжение мозга кислородом. Эти методы применимы для анализа деятельности мозга как в состоянии покоя, так и в период активности. Однако почти все эксперименты были поставлены таким образом, что их результаты наводили на мысль: большинство областей мозга практически не проявляют активности до тех пор, пока они не будут задействованы в выполнении конкретной задачи.

Обычно, проводя эксперименты с применением томографических методов, нейрофизиологи пытаются выяснить, какие области мозга связаны с теми или иными ощущениями или поведением. Лучший способ определения таких областей — сравнение активности мозга в двух взаимосвязанных ситуациях. Например, когда исследователи хотят увидеть, какие области мозга задействованы при чтении одного и того же текста вслух («тест») и про себя («контроль»), они сравнивают изображения при этих двух состояниях. Для того чтобы увидеть различия, нужно вычестить элементы изображения мозга, полученные при чтении про себя, из изображения, полученного при чтении вслух. Активность нейронов в областях, которые остаются «включенными», считают необходимой для чтения вслух. При этом все то, что называют внутренней активностью мозга, будет отсечено и отброшено. Подоб-

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Долгое время нейрофизиологи считали, что когда человек находится в покое, его мозг неактивен.
- Однако эксперименты с применением методов томографии показали, что в мозге поддерживается постоянный уровень фоновой активности.
- Этот пассивный режим, возможно, необходим для планирования будущих действий.
- Нарушение согласованной работы разных отделов головного мозга, вовлеченных в пассивный режим, может привести к таким неврологическим расстройствам, как болезнь Альцгеймера или шизофрения.

УМ В ПОКОЕ

Неинвазивные методы, такие как метод позитронно-эмиссионной томографии и функциональной магнитно-резонансной томографии, первоначально не обнаружили признаков фоновой активности головного мозга в то время, когда испытуемый ничем не занят. Таким образом, была получена ошибочная картина активности нейронов



Бездеятельное состояние (например, человек мечтает)



Сосредоточенная деятельность (например, чтение)

СТАРОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

Изначально казалось, что сканирование мозга демонстрирует отсутствие активности большинства нейронов, пока они не потребуются для какой-либо осознанной деятельности (например, чтения), после чего мозг «включается» и расходует энергию на передачу сигналов, необходимых для выполнения этой задачи



Активности в мозге не наблюдается



Высокая активность мозга

НОВОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ

В последние годы дополнительные эксперименты с применением методов томографии показали, что мозг поддерживает высокий уровень активности даже тогда, когда номинально находится «в покое». На самом деле, чтение или любые другие рядовые задачи требуют совсем не много дополнительной энергии — не более 5% той энергии, которая уже потребляется мозгом в этом очень активном фоновом состоянии



Высокая активность мозга



Очень высокая активность мозга

ные данные могут быть использованы как доказательство того, что некоторые участки мозга «включаются» для выполнения конкретной задачи, а в остальное время они неактивны — «выключены».

По прошествии некоторого времени наша группа и многие другие исследователи заинтересовались процессами, которые происходят в мозге, когда человек просто отдыхает и позволяет себе помечтать. Интерес был спровоцирован целым рядом работ, в которых исследователи указывали на существование такой «закулисной» активности.

Одна из идей родилась во время простого рассматривания томографических изображений. На них было видно, что некоторые участ-

ки мозга весьма активны и в ситуации «теста», и в ситуации «контроля». Такой общий «шум» не позволял увидеть различия в изображениях без компьютерного анализа. Дальнейшие исследования показали, что выполнение какой-либо конкретной задачи увеличивает потребление энергии мозгом всего лишь на 5% по сравнению с фоновой активностью. Большая часть всей активности (от 60 до 80% всей энергии, используемой мозгом) наблюдается в процессах, не связанных с каким-либо внешним раздражителем. Мы стали называть эту внутреннюю активность «темной энергией» мозга (в астрономии темная энергия — невидимая, гипотетическая энергия, которая составляет значительную

часть так называемой скрытой массы Вселенной).

На мысль о существовании подобной «темной энергии» нейронов наводят и данные о том, насколько малая часть информации от органов чувств достигает областей мозга, вовлеченных в ее обработку.

Из практически бесконечного объема информации об окружающем нас мире на сетчатку поступает всего 10 млрд битов информации в секунду. Поскольку в зрительном нерве, отходящем от сетчатки, только 1 млн выходных каналов, то лишь около 6 млн битов информации в секунду может покинуть сетчатку, и из них только 10 тыс. битов в секунду доходит до зрительной коры.

После дальнейшей обработки информация попадает в отделы головного мозга, ответственные за формирование осознанного зрительного образа. Удивительно, но объем порождающей его информации составляет менее 100 битов в секунду. Столь малого потока данных не должно хватать для формирования зрительного образа, если этот поток — единственный. Возможно, в процесс вовлечена и внутренняя активность мозга.

Еще одно доказательство существования процессов внутренней обработки информации можно найти, подсчитав количество синапсов (контактов между нейронами). В зрительной коре менее 10% от общего числа синапсов задействованы в передаче зрительной информации как таковой. Таким образом, их подавляющее большинство должно участвовать в формировании внутренних связей между нейронами в этой области мозга.

Как мы открыли пассивный режим работы мозга

Известно довольно много подобных фактов, указывающих на существование внутренней активности мозга. Однако требовалось понять ее физиологические механизмы, а также то, каким образом она может влиять на восприятие и поведение. Открыть феномен СПРРМ нам

помог случай — загадочные наблюдения, полученные во время экспериментов с ПЭТ, и их более позднее подтверждение методом фМРТ.

В середине 1990-х гг. мы неожиданно и совершенно случайно заметили, что в то время, когда испытуемые выполняют какую-либо задачу (например, читают вслух), в определенных участках мозга наблюдается снижение уровня активности по сравнению с фоновым состоянием покоя. В таких областях, куда входила и часть медиальной теменной коры, отвечающая, помимо всего прочего, за запоминание событий нашей собственной жизни, было зарегистрировано снижение активности, в то время как другие области были активны и выполняли определенные задачи. Сбитые с толку, мы назвали зоны, для которых характерно наибольшее угнетение, «загадочной медиально-теменной областью».

Серия экспериментов с использованием метода ПЭТ подтвердила, что в то время, когда мозг не занят осознанной деятельностью, он работает вовсе не вхолостую. На самом деле ММРА и многие другие зоны остаются постоянно активными — до тех пор, пока мозг не «фокусируется» на выполнении новой задачи: тогда в них происходит угасание активности. Наши выводы вначале были встречены с некоторым скептицизмом. В 1998 г. наша статья не была напечатана, поскольку рецензенты решили, что представленные данные о снижении активности были следствием ошибки. Однако другие исследователи смогли воспроизвести наши результаты для медиальной части теменной и префронтальной коры (благодаря деятельности которой мы можем представить себе, о чем думает другой человек; она же отвечает и за некоторые аспекты нашего эмоционального состояния). Оба этих участка в настоящее время считают основными центрами СПРРМ.

Благодаря открытию СПРРМ мы стали по-новому смотреть на внутреннюю активность мозга. До этих публикаций нейрофизиологи никог-

да не рассматривали совокупность обеих зон как целостную систему, подобную зрительной или двигательной, — т.е. как набор отдельных областей, взаимодействующих друг с другом для выполнения какой-либо задачи. Сообщество нейрофизиологов не воспринимало всерьез идею о том, что мозг может обладать подобной внутренней активностью. Возникает вопрос: характерна ли она только для СПРРМ, или же для всего мозга в целом? Получить ответ помогло удивительное открытие, сделанное при помощи метода фМРТ.

Метод фМРТ основан на регистрации уровня насыщения крови кислородом, вызванного изменениями интенсивности кровотока. Сигнал от любой области мозга в состоянии покоя медленно колеблется с периодичностью около 10 с. Эти медленные колебания считали случайным «шумом», и чтобы лучше отобразить активность мозга при конкретной исследуемой задаче, просто не учитывали.

Вопрос о правомерности такой позиции (отказа от учета низкочастотных сигналов) возник в 1995 г., когда Бхарат Бисвал (Bharat Biswal) и его коллеги из Висконсинского медицинского колледжа обнаружили, что даже когда испытуемый остается неподвижным, «шум» в зоне мозга, контролирующей движения правой руки, колеблется в унисон с «шумом» в такой же зоне на противоположной стороне мозга, отвечающей за движения левой руки. В начале 2000-х гг. Майкл Грейсиус (Michael Greicius) и его коллеги из Стэнфордского университета показали, что у испытуемого в покое можно наблюдать такие же синхронизированные колебания зоны СПРРМ.

Маркус Райхл (Marcus E. Raichle) — профессор радиологии и неврологии в Медицинском колледже при Университете имени Вашингтона в Сент-Луисе. Много лет Райхл возглавлял группу исследователей, которая изучает работу человеческого мозга, используя позитронно-эмиссионную и функциональную магнитно-резонансную томографию. Он был избран членом Института медицины в 1992 г. и членом Национальной академии наук в 1996 г.



ПРЕДПОСЫЛКИ ВОЗНИКНОВЕНИЯ НОВОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Исследователи знают, что только лишь капля из океана окружающей нас информации достигает центров ее обработки в мозге. Хотя через зрительный нерв, передается 6 млн битов информации только 10 тыс. битов достигают зрительной коры, и лишь несколько сот из них принимают участие в формировании осознанного восприятия — слишком мало, чтобы самостоятельно сформировать зрительный образ. Это открытие наводит на мысль, что мозг, возможно, постоянно прогнозирует события в окружающем нас мире для того, чтобы быть готовым к формированию соответствующей реакции

Поскольку интерес к роли СПРРМ в работе мозга возрастал, открытие группы Грейсиуса усилило и без того бурную деятельность в лабораториях всего мира, и в нашей в том числе. В результате все «шумы» (внутренняя активность основных мозговых систем) были картированы. Активность такого типа может наблюдаться даже под общим наркозом и во время легкого сна. Соответственно, возникло предположение, что это не просто «шум», а один из основополагающих аспектов работы мозга.

Проведенные исследования позволили прояснить ситуацию. Ока-

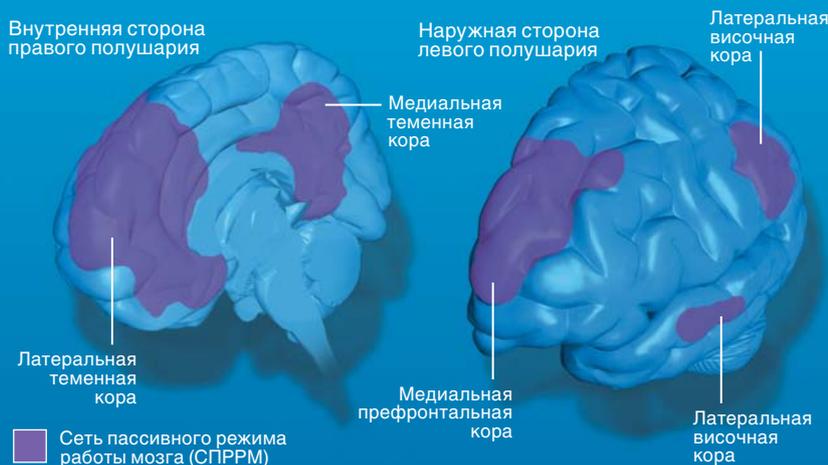
ОБ АВТОРЕ

СЕТЬ ПАССИВНОГО РЕЖИМА РАБОТЫ МОЗГА

Отделы головного мозга, работающие сообща и известные как сеть пассивного режима работы мозга (СПРРМ), возможно, отвечают за большую часть активности в то время, когда мы ни на чем не сконцентрированы. Именно они играют ведущую роль в процессах мышления

ЦЕНТР УПРАВЛЕНИЯ ▼

СПРРМ состоит из нескольких областей мозга, в том числе изображенных ниже



САМ СЕБЕ ДИРИЖЕР ►

СПРРМ, судя по всему, ведет себя словно дирижер оркестра, продуцируя сигналы, координирующие деятельность различных отделов головного мозга аналогично тому, как дирижер при помощи палочки управляет оркестром. Такая подача сигналов (например, для зрительной и слуховой зон коры) гарантирует, что все области мозга будут готовы сообща реагировать на стимулы



залось, что СПРРМ отвечает только за часть (но очень важную) общей внутренней активности, а пассивный режим работы характерен для всех систем мозга. В своей лаборатории мы натолкнулись на генерализованный пассивный режим в результате изучения электрической активности мозга, известной как медленные корковые потенциалы (МКП), при которой группы нейронов возбуждаются примерно каждые 10 с. Наше исследование показало, что спонтанные колебания при фМРТ и при регистрации МКП совпадали. Таким образом, одна и та же активность была зарегистрирована с помощью двух различных методов.

Далее мы стали выяснять, каковы функции МКП, т.к. известно, что они влияют на другие электрические сигналы мозга. Как показал Бергер и подтвердили многие другие исследователи, передача сигналов в мозге осуществляется в широком спектре частот, от низких частот МКП до 100 циклов в секунду и больше. Одна из ключевых задач нейрофизиологии заключается в том, чтобы понять, как взаимодействуют сигналы на различных частотах.

Оказывается, МКП играют очень важную роль. Результаты нашего и некоторых других исследований показали, что активность с более высокими частотами, чем та, кото-

рая наблюдается при МКП, может синхронизироваться с колебаниями или фазами МКП. Как отмечал недавно Матиас Палва (Matias Palva) и его коллеги из Хельсинкского университета, восходящая фаза МКП приводит к увеличению активности сигналов на других частотах.

Хорошей метафорой для иллюстрации работы мозга может служить симфонический оркестр с его сложным звуковым полотном, создаваемым многочисленными инструментами, звучащими в одном ритме. Сигналы МКП эквивалентны в этом примере движениям дирижерской палочки. Они регулируют доступ каждой системы мозга к «базе данных», в которой содержатся воспоминания и другая информация, необходимая для выживания в сложных условиях постоянно меняющегося мира. Благодаря МКП все процессы в мозге скоординированы и происходят точно в нужный момент.

Но мозг устроен сложнее, чем симфонический оркестр. Каждая специализированная система мозга (например, зрительная или моторная) имеет собственный тип МКП. При этом никогда не возникнет путаницы, поскольку системы мозга неравноправны. На вершине иерархии находится СПРРМ, которая выступает в качестве главного дирижера. Она отвечает за то, чтобы какофония сигналов от одной системы мозга не помешала передаче сигналов от другой системы. Подобная организация работы мозга не удивительна, поскольку он представляет собой не союз независимых структур, а скорее федерацию взаимосвязанных компонентов.

Тем не менее замысловатая внутренняя активность мозга должна соответствовать требованиям внешнего мира. Подобного приспособления можно добиться в случае, если понизить вклад МКП в СПРРМ в тот момент, когда требуется повысить уровень внимания в связи с новыми или неожиданными внешними событиями (например, когда по пути домой вы внезапно вспоминаете, что обещали купить пакет мо-

лока). Передача сигналов МКП возобновляется, как только исчезает потребность в повышенном внимании. Мозг непрерывно пытается найти баланс между плановыми ответными реакциями и сиюминутными потребностями.

Сознание и болезнь

Колебания активности СПРРМ могут дать нам представление о некоторых неразгаданных тайнах мозга. Например, исследователи уже могут проникнуть в суть феномена внимания — основного компонента сознательной активности. В 2008 г. интернациональная команда исследователей сообщила, что, наблюдая за СПРРМ с помощью томографических методов, они могли за 30 с предсказывать, когда испытуемый сделает ошибку в компьютерном тесте. Ошибка произойдет тогда, когда СПРРМ «возьмет верх» над активностью в областях, связанных с сознательной концентрацией внимания, и вызовет уменьшение этой активности.

В ближайшие годы «темная энергия» мозга может помочь найти подходы к разгадке природы сознания. Большинство нейрофизиологов признают, что наше сознательное взаимодействие с внешним миром — только малая часть активности мозга. Неосознаваемые процессы — например, «темная энергия» мозга — формируют тот контекст (или ту среду), небольшой фрагмент которой мы воспринимаем сквозь маленькое окошко сознания. Помимо возможности взглянуть из-за кулис на события, которые лежат в основе повседневного опыта, изучение «темной энергии» мозга может помочь понять природу основных неврологических заболеваний. Испытуемым больше не потребуются выполнять гимнастику для ума или сложные движения. Им будет нужно лишь оставаться в томографе, пока СПРРМ и другие центры «темной энергии» будут действовать.

К настоящему времени эти исследования уже пролили новый свет на природу некоторых заболеваний. Благодаря исследованиям с использованием томографа было обнару-

СЕТЬ И БОЛЕЗНЬ

СПРРМ перекрывается с областями мозга, вовлеченными в основные неврологические заболевания. Предполагают, что повреждения могут затрагивать и СПРРМ. Понимание того, на какие именно аспекты СПРРМ влияют болезнь Альцгеймера, депрессия или другие расстройства, может привести к обнаружению новых способов диагностики и лечения таких больных

БОЛЕЗНЬ АЛЬЦГЕЙМЕРА

Области мозга, которые поражаются при болезни Альцгеймера, тесно перекрываются с основными центрами СПРРМ

ДЕПРЕССИЯ

У пациентов наблюдается уменьшение связей между одной из зон СПРРМ и областями, связанными с эмоциями

ШИЗОФРЕНИЯ

Во многих зонах СПРРМ происходит увеличение уровня передачи сигналов. Значение этого факта в настоящее время исследуется.



жено, что в зонах СПРРМ видоизменены связи между клетками мозга у пациентов с болезнью Альцгеймера, депрессией, аутизмом и даже шизофренией. Вполне возможно, что когда-нибудь болезнь Альцгеймера охарактеризуют как болезнь СПРРМ. Очертания зон головного мозга, пораженных при этом заболевании, совпадают с картой областей СПРРМ. Такие закономерности могут служить биологическими маркерами для постановки диагноза, а также дать представление о причинах заболевания и помочь разработать стратегию лечения.

Заглядывая вперед, исследователи должны попытаться понять, каким образом скоординированная активность между разными мозговыми системами и внутри них осуществляется на уровне отдельных клеток, и каким образом СПРРМ управляет передачей химических и электрических сигналов по нейронным сетям. Для того чтобы объединить данные по исследованиям нейронов, их сетей и всех систем

мозга, а также получить целостную картину того, каким образом пассивный режим работы мозга функционирует как основной организатор своей «темной энергии», необходимы новые теории. И через некоторое время вполне может выясниться, что «темная энергия» — квинтэссенция работы нашего мозга. ■

Перевод: М.Б. Чернышева

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- Spontaneous Fluctuations in Brain Activity Observed with Functional Magnetic Resonance Imaging. Michael D. Fox and Marcus E. Raichle in *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 8, pages 700–711; September 2007.
- Disease and the Brain's Dark Energy. Dongyang Zhang and Marcus E. Raichle in *Nature Reviews Neurology*, Vol. 6, pages 15–18; January 2010.
- Two Views of Brain Function. Marcus E. Raichle in *Trends in Cognitive Science* (в печати).