
МЫСЛЬ

УПРАВЛЯЕТ РОБОТОМ

Мигель Николелис и Джон Чэпин



Обезьянка Бель карабкается по руке робота, которой она управляла из другой комнаты просто-напросто представляя себе движения руки в трехмерном пространстве.

Придет время, когда люди, прикованные к постели в результате неврологических расстройств или травм, смогут управлять инвалидными креслами, протезами и даже парализованными конечностями, просто-напросто «продумывая» их движения.

Когда крошечная подопытная обезьянка дурукули по имени Бель, удобно расположившись в специальном кресле в звуконепроницаемой камере лаборатории Университета Дьюка, видела, как на панели дисплея загорается ряд лампочек, ее правая рука хваталась за джойстик. Бель знала, что если внезапно вспыхнет свет и она передвинет джойстик в правильном направлении, ей в рот попадет немного фруктового сока. Эта игра ей нравилась, и она превосходно ее освоила.

К голове обезьянки была приклеена шапочка. Под ней размещались четыре пластиковых соединительных устройства с держателями (матрицами) микроэлектродов – проволочек тоньше человеческого волоса. Они были вживлены в ткань той области мозга Бель, которая отвечает за планирование движений и посылающую инструкции нервным клеткам в спинном мозге для дальнейшей реализации этих планов. Каждый из 100 микроэлектродов размещался у одного моторного (т. е. двигательного) нейрона. Когда нейрон генерировал электрический разряд, так называемый «потенциал действия», микроэлектрод «улавливал» электрический ток и через тонкий пучок проводов, выходящий из шапочки обезьянки, передавал его электронным устройствам, соединенным с двумя компьютерами. Один из них находился в соседней комнате, а другой – за тысячу километров от Бель, в Кембридже.

Долгие месяцы напряженной работы должны были завершиться испытанием, показывающим, возможно ли преобразование электрической активности мозга живого существа (проще говоря, мыслей нашей обезьянки) в сигналы, способные управлять действиями робота. В тот весенний день 2000 г. мы, без ведома Бель, смонтировали многозвенную руку робота, движениями которой обезьянке предстояло управлять. В общих чертах наш план выглядел так: головной мозг Бель фиксирует вспышку света, электронные устройства в режиме реального времени анализируют потенциалы действия нервных клеток, лабораторный компьютер преобразует паттерны электрической активности в инструкции, направляющие движения механической руки. А за тысячу километров, в Кембридже, другой компьютер выполняет такие же операции для другой искусственной руки, сконструированной Мандайамом Шринивасаном (Mandayam A. Srinivasan), заведующим Лабораторией по изучению контактов человек-машина в Массачусетском технологическом институте.

Нам требовалось преобразовать нейронную активность Бель в команды роботам всего за 300 миллисекунд. Именно такова естественная задержка между временем, когда моторная кора Бель планирует характер движения ее руки, и моментом, когда она посылает

мышцам соответствующие инструкции. Если головной мозг живого существа сможет управлять работой двух механических рук разной конструкции (несмотря на помехи и задержки в передаче сигналов, как в нашей лабораторной компьютерной сети, так и в сети Интернет), когда-нибудь это позволит больным людям управлять инвалидными колясками или даже парализованными конечностями.

И вот час пробил. Мы беспорядочно зажигали лампочки, и Бель тут же двигала рукоятку рычага в соответствии с сигналами, расположенными на панели. Руки нашего робота и робота в лаборатории Шринивасана двигались абсолютно синхронно с руками обезьянки, словно танцоры, управляемые электрическими импульсами, вспыхивавшими в мозгу Бель. ▶



С того памятного дня прошло два года. Сегодня наши лаборатории располагают самым современным нейрофизиологическим и компьютерным оборудованием, микроэлектронными устройствами и робототехникой для разработки методик, с помощью которых крысы, обезьяны, а со временем и люди смогут управлять механическими и электронными машинами, просто-напросто «продумывая» их движения. Наша главная цель – дать возможность людям, парализованным в результате неврологических расстройств или травм спинного мозга, но не имеющим серьезных поражений моторной коры, манипулировать креслами-каталками или механическими конечностями. Когда-нибудь исследователи помогут таким больным вновь обрести способность управлять собственными руками и ногами посредством беспроводной связи между имплантатами в головном мозге и конечностях. Это могло бы привести к созданию устройств, позволяющих восстанавливать или улучшать моторные, сенсорные или когнитивные функции.

Медикам пока не по силам ликвидировать последствия травм спинного и головного мозга. В будущем ученые, возможно, научатся регенерировать поврежденные нейроны или «программировать» стволовые клетки (те, что способны превращаться в клетки разного типа). Но в обозримом будущем наиболее реальный способ восстановления моторных функций – использование интерфейсов мозг-машина (ИММ), или нейропротезов. Успешные эксперименты, проведенные нами этим летом на макаках, выполнявших иные задания, нежели Бель, приблизили нас к этой цели еще на один шаг.

От теории к практике

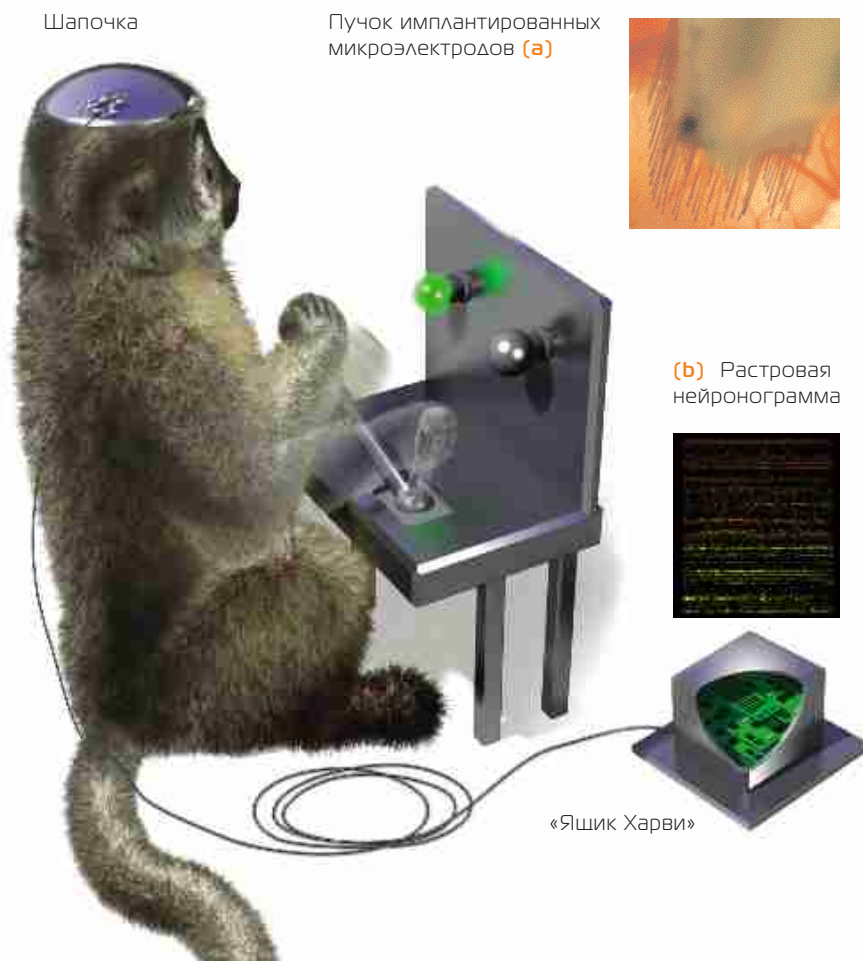
Недавние достижения в области интерфейсов мозг-машина отчасти основаны на открытиях 20-летней давности. В начале 1980-х гг. Апостолос Георгопулос (Apostolos P. Georgopoulos) из Университета Джонса Гоп-

кинса зарегистрировал электрическую активность одиночных нейронов моторной коры у макаков. Он обнаружил, что активность нервных клеток у обезьяны сильнее менялась тогда, когда она двигала рукой в определенном направлении. Когда же рука двигалась под некоторым углом к «предпочтительному» для нейронов направлению, их активность умень-

шалась пропорционально косинусу этого угла. Таким образом, выяснилось, что моторные нейроны коры «настроены» на широкий диапазон движений конечности и что, отдавая двигательную команду, головной мозг, вероятнее всего, руководствуется совместной активностью широко рассредоточенных популяций одиночных нейронов.

Когда Бель привела в движение многозвенную руку робота лишь одним усилием мысли, к ее голове была приклеена шапочка. Под нею размещались четыре пластиковых соединительных устройства, каждое с пучком имплантированных в кору тончайших микроэлектродов (а). Когда обезьянка замечала, что на панели вспыхивают лампочки, и принимала решение переместить рукоятку джойстика вправо или влево, микроэлектроды регистрировали электрические сигналы от активированных нейронов коры и передавали их электронным устройствам в «ящик Харви» «Ящик Харви» собирал, фильтровал, усиливал сигналы и пересылал их серверному

Бель в лаборатории Университета Дьюка в Дареме, штат Северная Каролина



Однако всякий раз, когда животное двигало конечностью, Георгопулос регистрировал активность лишь одного нейрона, расположенного в моторной области коры. А такой подход не мог подтвердить рабочую гипотезу – что схема кодирования движения возникает в результате одновременной активности многочисленных нейронов, расположенных во многих

корковых областях. Ученым было известно, что двигательные команды планируются и генерируются мозгом при взаимодействии лобной и теменной долей. Но технические возможности не позволяли нейрофизиологам осуществлять одновременную регистрацию нейронов в разных областях коры. Кроме того, большинство ученых в то время полагало, что

представление о работе головного мозга можно получить, изучая свойства нейронов «поодиночке» – подход, сравнимый разве что с попыткой объяснить экологическую структуру леса с помощью описания свойств отдельных деревьев.

К счастью, эту точку зрения разделяли далеко не все нейрофизиологи. Когда 14 лет назад авторы этой статьи ▶

Рука Бель длиной в тысячу километров

компьютеру в соседней комнате. Сигналы, поступавшие в ящик, могли быть представлены в виде растровых нейрограмм (б). Каждый горизонтальный ряд соответствует активности одиночного нейрона, зарегистрированной на протяжении некоего отрезка времени, каждый цветной штрих – разряд этого нейрона в данный момент времени.

В свою очередь компьютер предсказывал траекторию движения руки, которое намеревалась совершить обезьянка Бель (с), и преобразовывал эту информацию в команды для воспроизведения этого движения механической рукой. Затем этот компьютер передавал команды другому, управлявшему рукой робота и находившемуся в комнате, расположенной в противоположном конце холла. Одновременно он посылал команды из нашей лаборатории в Дареме роботу в лаборатории, расположенном за тысячу километров от нашей. В результате обе механические руки двигались абсолютно синхронно с рукой Бель.

Компьютер (слева) и рука робота (справа) в комнате, расположенной в другом конце холла



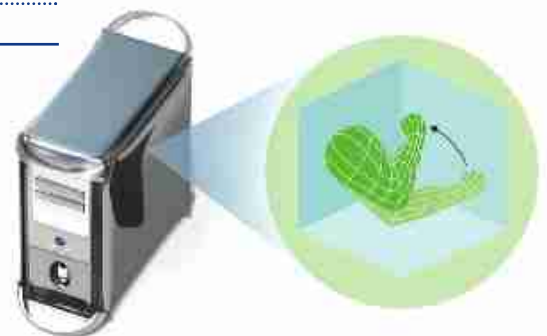
Обе механические руки двигались абсолютно синхронно

Лаборатория в г. Кембридж, штат Массачусетс



Сигнал, посланный через Интернет

Сервер в комнате, соседней с комнатой Бель



(с) Предсказанная траектория движения руки

встретились в Университете Ханемана, речь тут же зашла об одновременной регистрации множества одиночных нейронов. В 1993 г. им удалось одновременно зарегистрировать активность 48 нейронов, расположенных в 5 структурах сенсомоторной системы крысы, т. е. в тех отделах головного мозга, которые воспринимают сенсорную информацию и используют ее для регуляции движений.

Мы добились столь успешных результатов благодаря новому поколению электродов, предназначенных для вживления в мозг животных. Они были изготовлены из нержавеющей стальной проволоки микроскопического диаметра с тефлоновым покрытием. В те годы большинство нейрофизиологов пользовалось стандартными электродами, напоминавшими швейные иглы. Эффективно работали они лишь несколько часов, т. к. у их кончиков скапливались химические компоненты клеток, образывавшие слой электроизоляции. Кроме того, острие электродов повреждало нейроны даже при незначительных смещениях головного мозга, неизбежно сопровождающих обычную двигательную активность животного. Микроэлектроды, разработанные в нашей лаборатории, были более гибкими и имели более тупые кончики диаметром около 50 микрон. Это дало нам возможность регистрировать активность одиночных нейронов целыми месяцами, и когда эта методика была освоена, мы приступили к

разработке систем для преобразования мозговых сигналов в команды, способные управлять работой механического устройства.

Совместно с инженером-электриком Харви Уиггинсом (Harvey Wiggins), Доналдом Вудвордом (Donald J. Woodward) и Сэмюелем Дэдвайлером (Samuel A. Deadwyler) из Медицинской школы Университета Уэйк-Форест мы сконструировали небольшой «ящик Харви» со специально сконструированными электронными устройствами, обеспечивающими выборочный анализ, фильтрацию и усиление нейронных сигналов, отводимых многочисленными электродами. Специально разработанные программы, благодаря анализу особенностей электрического разряда каждой из клеток, позволяли дифференцировать электрическую активность до 4 нейронов, одновременно регистрируемых одним электродом.

Головной мозг крысы управляет движениями рычага

В специальной серии опытов, проведенных в середине 1990-х гг. мы обучали крысу управлять движениями рычага лишь усилием «мысли». Вначале мы тренировали животное нажимать передней лапой на педаль, соединенную с рычагом, находившимся за пределами клетки. Когда крыса нажимала на нее, электронное устройство наклоняло рычаг, и из желоба вытекала вода, которую животное могло выпить.

На голове крысы мы укрепили небольшой аналог интерфейса мозг-машина, которым впоследствии предстояло воспользоваться Бель. Всякий раз, когда головной мозг животного отдавал лапе команду нажать на педаль, осуществлялась одновременная регистрация потенциалов действия 46 нейронов. Интегратор, запрограммированный с помощью подбора регистров, оценивал и обрабатывал сигналы нейронов и генерировал единый аналоговый выход, очень точно предсказывавший траекторию движения лапы крысы. Мы соединили этот интегратор с устройством управления, посредством которого он мог передавать команды рычагу.

Когда крыса научилась нажимать на педаль, чтобы получать воду, мы отсоединили ее от рычага. Крыса давила на педаль, но ничего не происходило. Зверек отчаянно повторял это действие много раз. И вдруг рычаг наклонился, и крыса получила каплю воды. Животное не ведало, что 46 нейронов в его мозгу выдали точно такой же паттерн импульсной активности, что и в случаях, когда нажатие на педаль избавляло крысу от жажды. И этот паттерн заставил интегратор привести в движение рычаг.

Спустя несколько часов крыса окончательно поняла, что ей больше не нужно нажимать на педаль. Стоило зверьку представить, что он это делает, как нейроны начинали генерировать такой паттерн импульсной активности, который наш интерфейс мозг-машина воспринимал как двигательную команду к опусканию рычага. В общей сложности это задание успешно освоили 4 из 6 крыс. Они поняли, что им нужно лишь «продумать» действие. И никакой мистики в этом нет: вы тоже можете мысленно представить, как ваша рука тянется к какому-нибудь предмету. Точно так же и человек с травмированной или ампутированной конечностью смог бы управлять движениями руки робота, соединенной с его плечом.

ОБЗОР: ИНТЕРФЕЙСЫ МОЗГ-МАШИНА

- Крысы и обезьяны, чей головной мозг был соединен проводами с компьютером, успешно управляли рычагом или рукой робота, просто представляя себе, как их собственная конечность нажимает на педаль или совершает движения.
- Эти «трюки» стали возможными благодаря созданию нового поколения микроэлектродов для вживления в моторную кору животных и разработке алгоритмов, преобразующих электрическую активность нейронов головного мозга в команды, способные управлять механическими устройствами.
- Создание сложных интерфейсов мозг-машина для человека – дело далекого будущего, но технологические разработки, в конце концов, позволят людям, лишившимся руки, управлять рукой робота одним усилием мысли, а больным с травмой спинного мозга – вновь обрести контроль над парализованной конечностью.

Заглядывая в будущее

КОГДА-НИБУДЬ интерфейс мозг-машина сможет помочь больному, чьи конечности оказались парализованными в результате травмы спинного мозга. Крошечные пучки микроэлектродов, имплантированных в различные моторные зоны коры головного мозга, будут соединены с нейрочипом в черепе. Когда больной представит себе, как движется его парализованная рука, чтобы, к примеру, взять со стола яблоко, нейрочип преобразует его мысли в последовательность радиочастотных сигналов и без помощи проводов передаст их небольшому, работающему на батарейках «компьютеру-рюкзак», размещенному за спинкой кресла.

Компьютер преобразует эти сигналы в двигательные команды и передаст их (снова без помощи проводов) другому микрочипу, имплантированному в руку больного. Этот микрочип сможет стимулировать нервы, которые заставят мышцы руки совершить требуемое движение. «Компьютер-рюкзак» сможет управлять также двигателем и тормозной системой кресла-каталки, стоит только больному мысленно представить себе, куда он хочет на нем доехать. Кроме того, компьютер сможет передать сигналы установленной на кресле руке робота.



Головной мозг обезьяны управляет движениями руки робота

Успехи подопытных крыс вдохновили нас. Мы решили пойти дальше – заставить руку робота воспроизвести «трехмерные» движения, совершаемые конечностью обезьяны – животного, чей головной мозг имеет гораздо большее сходство с человеческим, чем крысиный.

В это время один из авторов статьи (М. Николеллис) создал собственную нейрофизиологическую лабораторию в Университете Дьюка. Там мы и сконструировали интерфейс, позволяющий одновременно регистрировать активность до 100 нейронов в лобных и теменных долях коры. Сначала мы испытали его работу на нескольких обезьянках дурукули. Выбор пал на этих животных потому, что моторные зоны представлены у них гладким поверхностным слоем коры, что значительно облегчает вживление микроэлектродов в мозг.

В своих первых экспериментах мы обучали обезьян (в том числе и Бель) двигать джойстик влево и вправо в ответ на появление света в левой или правой частях экрана. Через некоторое время мы усаживали их в кресла перед непрозрачной перегородкой. Когда она поднималась, обезьяны видели перед собой лежащий на подносе фрукт. Животные должны были протянуть руку, взять его, поднести ко рту и вернуть руку в исходное положение.

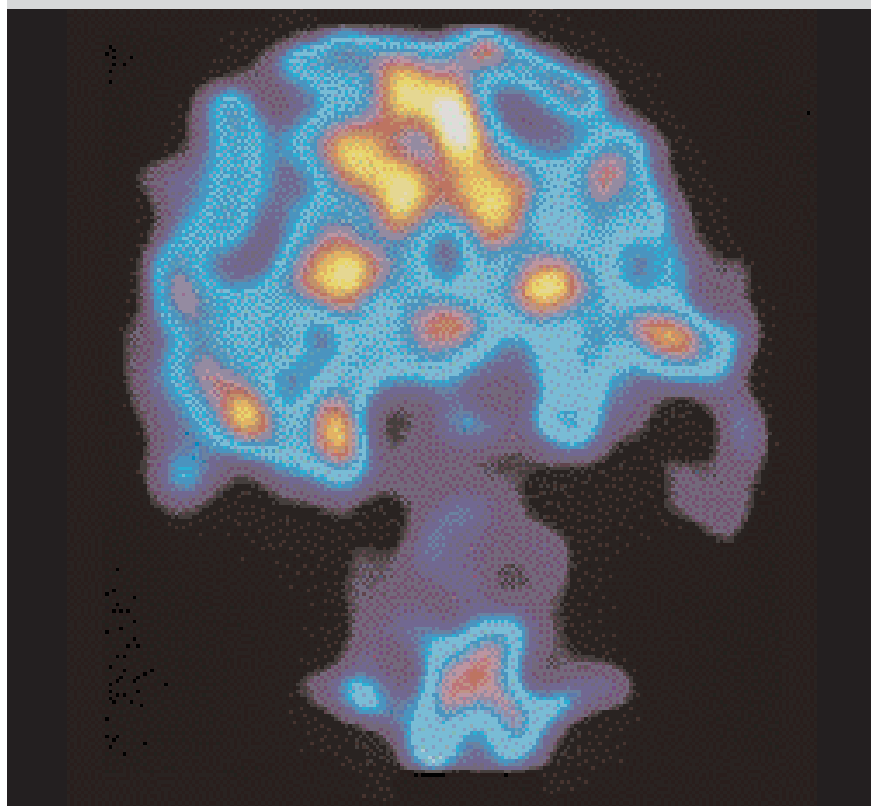
Положение руки животного можно было точно предсказать за несколько сотен миллисекунд на основании простого суммирования электрической активности моторных нейронов коры. Это открытие было сделано Йоханом Вессбергом (Johan Wessberg), ныне работающим в Гетенборгском университете в Швеции. Главная хитрость заключалась в том, что для наиболее эффективного предсказания движений в реальном времени компьютер должен был непрерывно суммировать активность, генерируемую нейронами за секунду до совершения животным этих движений.

Блокада судорог

Как показали недавние исследования, в будущем интерфейсы мозг-машина позволят предотвращать судорожную активность головного мозга у больных, страдающих тяжелыми формами хронической эпилепсии. Судорожные припадки в этом случае могут развиваться по несколько десятков раз в день, что делает жизнь больного невыносимой и может привести к тяжелому поражению мозга. Что еще хуже, больные, как правило, становятся толерантными к традиционной медикаментозной терапии.

Для предотвращения судорог ИММ будет функционировать наподобие водителя сердечного ритма (пейсмекера). Он будет постоянно следить за электрической активностью головного мозга и выявлять паттерны, свидетельствующие о приближении припадка. Если ИММ выявит такой сигнал, он передаст в мозг или периферическому нерву электрическое раздражение, которое подавит развитие припадка или стимулирует высвобождение противосудорожного лекарства.

В Университете Дьюка мы обосновали возможность такого подхода. ИММ обеспечивали микроэлектроды, вживленные в мозг крыс, которым вводился пентилентетразол – препарат, вызывающий повторные эпилептические припадки средней тяжести. Развитие припадка сопровождается высоко синхронными вспышками активности корковых нейронов. Когда «мозговой пейсмекер» выявлял такой паттерн активности, он запускал электрическую стимуляцию одной из ветвей тройничного нерва – большого небного нерва. Короткий стимул быстро и эффективно, не повреждая нерв, прерывал эпилептическую активность и снижал частоту развития и длительность судорог.



Головной мозг во время эпилептического припадка. Желтым выделены зоны повышенной активности мозга. Изображение получено с помощью позитронно-эмиссионной томографии.

Затем, в самый разгар исследований, мы приобрели более совершенную модель «ящичка Харви». С помощью этого устройства и нескольких, специально разработанных алгоритмов реального времени наш компьютер производил выборки и интегрировал каждые 50–100 миллисекунд потенциалы действия нейронов. Компьютерные программы преобразовывали выход в инструкции, способные направлять движения руки робота в трехмерном пространстве. Затем мы использовали интерфейс мозг-машина для управления роботом. Когда в один из тех незабываемых дней 2000 года мы наблюдали за тем, как многозвенная рука робота повторяет жесты Бель, нам едва верилось в реальность происходящего. Ведь из десятков миллионов нейронов головного мозга работу руки осуществляли всего-навсего 50–100 наугад выбранных нами нервных клеток!

Последующий математический анализ показал, что точность движений робота приблизительно пропорциональна числу регистрируемых нейронов, но с увеличением их числа эта линейная зависимость начинала сходиться на нет. Выборка из 100 нейронов позволяла нам создавать траектории движений робота, совпадавшие с траекториями руки обезьяны примерно на 70%. Как показал последующий анализ, для 95% точности достаточна выборка всего из 500–700 нейронов (в зависимости от того, в какой области мозга находятся нервные клетки). В настоящее время мы пытаемся определить число нейронов, необходимое для воспроизведения движений в трех плоскостях. Подозреваем, что и в этом случае счет пойдет на сотни, а не на тысячи нейронов.

Полученные результаты указывают на то, что в пределах каждой корковой области «нервная команда» имеет диффузную локализацию. Животному такая «децентрализация» очень выгодна: в случае травмы у головного мозга имеется огромный запас резервных элементов. А для исследователей это означает,

что работу нейропротеза, основанного на ИММ и предназначенного для парализованных больных, могут обеспечить гораздо меньшие популяции нейронов, чем предполагалось прежде.

Эксперименты с Бель и с другими животными показали, что, по мере того как они все лучше справлялись с заданием, свойства их нейронов изменялись – иногда через несколько дней, а иногда и в ходе двухчасового эксперимента. Чтобы приспособиться к такому «моторному обучению», мы дополнили нашу модель простой программой, позволившей периодически переоценивать вклад каждого нейрона. Нервные клетки, перестававшие играть значимую роль, исключались из модели, а нейроны с более выраженной активностью вводились в нее. По сути дела, мы научились «вычлениать» из головного мозга нервный выход, определяющий траекторию движения руки.

Важно отметить, что постепенное изменение характера нейронной активности расширяет пластические возможности головного мозга. Количество потенциалов действия, генерируемое нейроном перед данным движением руки, изменяется по мере того, как совершенствуются навыки животного в экспериментальной ситуации. И все же динамичное изменение свойств нейронов не составляет помехи для практического использования интерфейсов мозг-машина. Одно из преимуществ диффузного нейронного выхода заключается в том, что он не зависит от функционирования какой-либо небольшой группы нейронов. Если ИММ может поддерживать надежную регистрацию активности сотен и даже тысяч одиночных нейронов в течение нескольких месяцев и даже лет и использовать модели, способные к обучению, он легко «приспособится» к изменению свойств нейронов, гибели нервных клеток и даже к ухудшению качества регистрации нейронной активности микроэлектродами.

Использование сенсорной обратной связи

Эксперименты с участием Бель доказали, что ИММ может «сотрудничать» с головным мозгом примитивных приматов. Но можно ли приспособить его для работы с более сложным мозгом? Чтобы ответить на этот вопрос, в мае 2001 г. мы начали серию экспериментов с участием трех макаков. Поверхность головного мозга этих обезьян покрыта глубокими бороздами и извилинами, напоминающими мозг человека.

В исследовании применялся такой же ИММ, что и в экспериментах с Бель, но с одним существенным дополнением: теперь, используя зрительную обратную связь, обезьяны сами могли судить о том, насколько точно ИММ воспроизводит движения их рук. Произвольно двигая джойстик в разных направлениях, животные могли изменять положение курсора на экране компьютера. Внезапно в каком-либо месте экрана появлялась круглая мишень. Для того чтобы получить глоток фруктового сока, обезьяна должна была быстрым движением джойстика (в пределах 0,5 секунды) «попасть» курсором в мишень.

Первой успешно справилась с этим заданием изящная самка по кличке Аврора, которая с явным удовольствием демонстрировала свое умение ловко «поражать цель». Сотрудники нашей лаборатории Рой Крист (Roy Crist) и Хосе Кармена (Jose Carmena) в течение года регистрировали активность до 92 нейронов в пяти лобных и теменных областях коры этой обезьянки.

Когда Аврора полностью освоила «игру», мы решили подшутить над ней. Примерно в 30% испытаний мы прерывали связь между джойстиком и курсором. Отныне обезьяна должна была полагаться исключительно на активность своего мозга, анализируемую ИММ. Какое-то время Аврора еще продолжала совершать движения руками, но через несколько дней поняла, что может полностью регулировать положение курсора мозгом. Через несколько недель, в тече-

ние которых ежедневно проводились испытания, обезьяна вообще перестала утруждать себя: она перемещала курсор, просто мысленно «прочерчивая» его траекторию на экране.

Но и это не все. Поскольку Аврора могла следить за ходом выполнения ею задания с помощью экрана, предсказания интерфейс мозг-машина становились все более точными – даже в тех случаях, когда регистрировалась активность одних и тех же нейронов. Зрительная обратная связь помогла Авроре максимизировать реакцию ИММ на обучение как мозга, так и машины. А если так, то зрительная или какая-либо иная сенсорная обратная связь позволит людям улучшать функционирование своих собственных интерфейсов мозг-машина.

Когда мы писали эту статью, прошел год, как в головной мозг Авроры были вживлены микроэлектроды; с тех пор мы ежедневно регистрируем активность 60–70 нейронов. А это означает, что наша конструкция микроэлектродов способна обеспечить длительное, высококачественное многоканальное отведение электрических сигналов даже у приматов со «складчатой» поверхностью коры. Хотя за минувший год популяция регистрируемых нейронов (состоявшая из 92) несколько уменьшилась, «сотрудничество» обезьянки с ИММ остается на самом высоком уровне.

Мы собираемся предложить Авроре более сложные задания. В мае 2002 г. мы приступили к модификации интерфейса мозг-машина для подготовки новой серии опытов с использованием тактильной обратной связи. ИММ будет управлять рукой робота, снабженной механизмом захвата, имитирующим кисть. Силовые датчики сообщат о том, что рука робота соприкоснулась с предметом и определят силу, необходимую для его удержания. Вживление под кожу небольших вибраторов обеспечит тактильную обратную связь, благодаря которой Аврора сможет узнать, насколько предмет тяжел, скользок и т. д. ▶

По изменению частоты вибраций обезьянка сможет судить о том, какая сила потребуется руке робота, чтобы, к примеру, поднять кусочек фрукта, удержать его на весу и донести до рта. Такой эксперимент стал бы самым убедительным доказательством того, что даже тяжело парализованный человек вполне может вернуть себе

ной мозг животного включит руку робота в «представительства» тела, можно ожидать, что то же самое сможет сделать и мозг парализованного человека.

Головной мозг очень пластичен. Но всему есть предел. Маловероятно, например, что человек, перенесший тяжелый инсульт, сможет обрести полный контроль над функциониру-

ющих осложнений, требуют проверки клиническими испытаниями.

Исследователям необходимо выяснить, смогут ли мультиэлектроды обеспечить надежную регистрацию нейронной активности, не вызывая повреждений нервной ткани и риска инфекции. Наметилась тенденция к созданию плотных мультиэлектродов.

Наша главная цель – дать возможность людям, парализованным в результате неврологических расстройств или травм спинного мозга, манипулировать креслами-каталками или механическими конечностями. Когда-нибудь исследователи помогут таким больным вновь обрести способность управлять собственными руками и ногами посредством беспроводной связи между имплантатами в головном мозге и конечностях.

способность двигать конечностями благодаря вживленному в мозг имплантату, соединенному (проводами или без них) с генераторами сигналов в руке или ноге.

Если зрительные и тактильные ощущения имитируют информацию, которой обычно обмениваются рука Авроры с головным мозгом, то долгосрочное взаимодействие с ИММ сможет, по-видимому, «побудить» головной мозг включить робота в свои «представительства». Иными словами, не исключено, что мозг приобретет способность воспринимать искусственное устройство как еще одну часть тела, а нервная ткань мозга сможет обслуживать руку робота.

Для проверки этой гипотезы мы проведем новую серию экспериментов, подобных тем, в которых участвовала Аврора, с той лишь разницей, что рука подопытного животного будет анестезирована, чтобы блокировать передачу любой естественной информации по принципу обратной связи. Если голов-

ванием робота. Как правило, поражения мозга при такой болезни имеют обширный характер и затрагивают большую массу белого вещества (состоящего из нервных волокон, связывающих друг с другом отдельные области мозга), а это приводит к сильному снижению пластичности. Вот почему жертвы инсульта, утратившие способность двигать неповрежденными конечностями, обретают ее вновь довольно редко.

Оценка реальных возможностей

Какими бы обнадеживающими ни казались достижения нейрофизиологии, ученые не имеют права давать людям пустых обещаний. Предстоит еще преодолеть множество трудностей, пока интерфейсы мозг-машина по праву будут считаться безопасным, надежным и эффективным терапевтическим средством. Способность ИММ улучшать состояние больных, не подвергая их риску других неврологиче-

Гэри Лихью (Gary LeHew), инженер-электронщик из Университета Дьюка, разработал способы, значительно увеличивающие число микроэлектродов в легком пучке, имплантация которого в мозг не представляет особых сложностей. Сегодня мы можем вживлять множественные пучки; каждый, размером с ноготь мизинца (5x8 мм), содержит до 160 микроэлектродов. Недавно мы вживили в восемь корковых зон макаки в общей сложности 704 микроэлектроды и одновременно регистрировали активность 318 нейронов.

Мы уже начали разрабатывать имплантируемые микроэлектронные устройства, благодаря которым для распознавания паттернов нейронной активности более не потребуются программы, что в конце концов освободит ИММ от «компьютерного бремени». Совместно с Лабораторией Патрика Вульфа из Университета Дьюка мы создали первый беспроводный нейрочип и испытали его функционирование на обезьянке Авроре. Вспыш-

ки нейронных импульсов на экране монитора, расположенного на расстоянии многих метров от обезьяны – впервые транслируемые посредством беспроводного соединения между головным мозгом примата и компьютером! – заставили нас поволноваться.

Все больше ученых начинают понимать, какую колоссальную помощь могут оказать интерфейсы мозг-машина людям, попавшим в беду. В прошлом году нейропротезами стали заниматься несколько неврологических лабораторий традиционного направления. Предварительные результаты исследований недавно были получены в Университете штата Аризона, Университете Брауна и Калифорнийском технологическом институте. Некоторые исследования подтверждаются данными, полученными нами в результате опытов на крысах и обезьянах. Ученые из Университета штата Аризона в общих чертах воспроизвели наш метод изучения «трехмерных» движений у обезьян дурукули и показали, что его с успехом можно применять и на резусах. В экспериментах, проведенных в Университете Брауна, макак резус должен был перемещать курсор по экрану монитора. Обе группы ученых регистрировали у каждого животного по 10–20 нейронов. Успех их исследований – наглядное подтверждение тому, насколько быстро развивается эта новая область науки.

В наиболее эффективных в практическом плане интерфейсах мозг-машина будет использоваться одновременная регистрация от нескольких сотен до нескольких тысяч одиночных нейронов, расположенных в многочисленных двигательных зонах лобных и теменных долей. Какой-либо клинической пользы от интерфейсов, основанных на регистрации небольшого числа (30 и менее) нейронов в одной корковой области, ждать не приходится: им будет недоставать «резервной мощности», требующейся для адаптации системы к гибели нервных клеток или изменению

их реактивности. Скорее всего, бесполезной станет и другая крайность – регистрация миллионов нейронов с помощью макроэлектродов: такая процедура может оказаться слишком инвазивной.

Неинвазивные методы, обещающие дать неплохие результаты в некоторых областях медицины, найдут, вероятно, ограниченное применение и для управления протезом с помощью мысли. Отведение электрической активности с поверхности головы, получившее название электроэнцефалографии (ЭЭГ), – метод, способный обеспечить функционирование ИММ иного рода. Нильс Бирбаумер (Niels Birbaumer) из Тюбингенского института в Германии с успехом использовал ЭЭГ и компьютерный интерфейс для обучения парализованных больных регулированию своей ЭЭГ-активности таким образом, чтобы можно было выбирать на экране компьютера нужные буквы и затем составлять из них сообщения. Хотя этот процесс требует много времени, он дает таким больным единственную возможность общаться с окружающим миром. И все-таки ЭЭГ-сигналы не могут непосредственно использоваться для управления протезами конечностей: они отражают некую усредненную электрическую активность очень широкой популяции нейронов; из них трудно вычленивать тончайшие колебания электрической активно-

сти, необходимые для кодирования точных движений руки.

Несмотря на предстоящие трудности, у нас есть все основания смотреть в будущее с оптимизмом. Не исключено, что первый человеческий нейропротез начнет функционировать только через десятилетие. Но перед глазами до сих пор стоят фантастические возможности, впервые ошеломившие нас в тот памятный день в Дареме, когда экран компьютера светился яркими вспышками нейронной активности Бель. Мы навсегда сохраним то благоговейное чувство, с каким «подсматривали» за процессом рождения мысли в головном мозге обезьянки. Бель думала всего лишь о том, как бы ей заполучить сок, но даже эта немудреная мысль смогла отдать приказ окружающему миру и помогла обезьянке добиться вполне реальной цели. ■

ОБ АВТОРАХ

Мигель Николеллис (Miguel A. L. Nicolelis) и **Джон Чэпин** (John K. Chapin) сотрудничают уже более десяти лет. М. Николеллис родился в Бразилии и получил степени доктора медицины и доктора философии в области нейрофизиологии в Университете Сан-Паулу. Сегодня он один из директоров Центра нейротехнологии и профессор нейробиологии, биомедицинской технологии и нейропсихологии в Университете Дьюка. Дж. Чэпин получил степень доктора философии в области нейрофизиологии в Рочестерском университете, а затем работал в Университете Техаса и Медицинской школе при Университете Ханеманна (ныне Медицинский колледж Университета Дрейселя). В настоящее время – профессор физиологии и фармакологии в Медицинском центре Даунстейт Университета штата Нью-Йорк.