



НЕЙРОТЕХНОЛОГИИ

МАШИНА ЖЕЛАНИИ

Нейрокомпьютерный интерфейс нового поколения
понимает, чего хочет человек

Ричард Андерсен

ОБ АВТОРЕ

Ричард Андерсен (Richard Andersen) — профессор нейробиологии, руководитель Центра нейрокомпьютерного интерфейса Тяньцзяо и Крисси Чэнь в Калифорнийском технологическом институте. Он изучает нейронные механизмы зрения, слуха, равновесия, осязания и движения, а также создание нейронных протезов. Андерсен — член Национальной академии наук и Национальной академии медицины.



У меня мурашки бегут по коже каждый раз, когда я это вижу. Парализованный доброволец сидит в инвалидной коляске и управляет компьютером или роботизированной рукой с помощью мысли — так выглядит нейрокомпьютерный интерфейс (НКИ), также известный как интерфейс «мозг — компьютер», в действии. Эрик Сорто, получивший огнестрельное ранение в возрасте 21 года, более десяти лет назад, в 2013 г. в моей лаборатории впервые за все это время смог без посторонней помощи выпить пива и использовал для этого лишь силу мысли. НКИ передал нервный сигнал от высокоуровневого участка коры. Электромеханическое приспособление дотянулось до бутылки, схватило ее и поднесло к губам Сорто перед тем, как он сделал глоток. Он пил спустя год после операции по вживлению в мозг электродов, позволяющих сигналам от мыслей запускать движение. Мы с коллегами по лаборатории с удивлением наблюдали, как он выполнял эту кажущуюся простой, но на самом деле весьма сложную задачу.

При наблюдении за этим достижением сразу же возникает вопрос, как простые мысли могут управлять механическим протезом. Мы ежедневно, не задумываясь, двигаем нашими конечностями, и простое выполнение таких действий — задача любого современного НКИ. Однако нейробиологи десятилетиями пытались расшифровать нейронные сигналы, запускающие движения, которые позволяют дотянуться и схватить объект. Скудность успехов в прочтении таких сигналов побудила искать новые способы подключиться к этой какофонии, создаваемой электрической активностью 86 млрд общающихся между собой нейронов. НКИ нового поколения создают прямую связь между мозгом

и протезом, точно подключаясь к тем областям мозга, где формулируется действие — взять чашку или сделать шаг.

От мозга к роботу

Интерфейс «мозг — компьютер» работает путем отправки и получения — «записывания» и «считывания» сообщений к мозгу и от него. Существует два основных класса нейрокомпьютерных интерфейсов. «Записывающие» НКИ обычно используют электрическую стимуляцию для передачи сигнала к нервной ткани. Для этой технологии уже есть успешное клиническое использование. Кохлеарный имплантат стимулирует слуховой нерв, позволяя глухим слышать. С помощью глубокой стимуляции

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

- Нейрокомпьютерные интерфейсы (НКИ) могут взаимодействовать с нейронными цепями, посылая и принимая сообщения.
- Существующие на сегодня интерфейсы «мозг — компьютер», как правило, работают медленно и неточно.
- В новых исследованиях интерфейс помещают в те области мозга, которые отвечают за намерение сделать движение; такая технология лучше подходит людям с повреждениями спинного мозга.

базальных ганглиев — области, контролирующей двигательную активность, — лечат такие двигательные нарушения, как болезнь Паркинсона и эссенциальный тремор. Сейчас проходят клинические испытания устройства, стимулирующие сетчатку для облегчения некоторых форм слепоты.

В то же время «считывающие» НКИ, которые регистрируют нейронную активность, пока еще только на стадии разработки. Прежде чем эта технология следующего поколения попадет к пациентам, необходимо решить нетривиальные проблемы, связанные с чтением нервных сигналов. Грубые способы считывания уже существуют. Электроэнцефалография (ЭЭГ) позволяет регистрировать усредненную активность миллионов нейронов, содержащихся в нескольких сантиметрах мозговой ткани, но не показывает сигнал одного нейрона в отдельной цепи. Функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ) — косвенный способ оценки нейронной активности, она показывает увеличение кровотока в активной области. Она может отображать области меньшего размера, чем видны по ЭЭГ, но ее разрешение все же слишком низкое. Изменения кровотока медленные, поэтому фМРТ не позволяет различать быстрые изменения в активности мозга.

Для того чтобы преодолеть эти ограничения, в идеале хотелось бы регистрировать активность отдельных нейронов. Наблюдение за изменениями частот разрядов большого числа одиночных нейронов дало бы наиболее полную картину происходящего в определенной области мозга. В последние годы стало возможно выполнять такую регистрацию с помощью множества тонких электродов, имплантированных в мозг. Сейчас используются пластины 4×4 мм со 100 электродами. Каждый электрод выступает из пластины на 1–1,5 мм. Такое устройство, напоминающее утыканную гвоздями кровать, способно регистрировать активность от 100 до 200 нейронов.

Сигналы, записанные с помощью этих электродов, поступают в «декодеры», которые с помощью математических алгоритмов переводят различную частоту разрядов отдельных нейронов в сигнал, запускающий определенное движение, например управление роботизированной рукой или компьютером. Такие считывающие НКИ помогут пациентам с неизлечимыми



Интерфейс, разработанный группой под руководством Ричарда Андерсена из Калифорнийского технологического института (слева), позволил Эрику Сорто (справа) управлять роботизированной рукой

повреждениями мозга при поражении спинного мозга, инсульте, рассеянном склерозе, боковом амиотрофическом склерозе и мышечной дистрофии Дюшенна.

Наша лаборатория работает с тетраплегическими пациентами, которые из-за повреждения спинного мозга неспособны пошевелить ни руками, ни ногами. Мы регистрируем сигналы в коре — слое толщиной примерно 3 мм, покрывающем большие полушария мозга. Площадь коры каждого из полушарий в развернутом виде составляет около 80 тыс. мм². По мере появления новых данных выделяют все больше число функциональных областей коры; сейчас их насчитывается более 180. Они обрабатывают сенсорную информацию, взаимодействуют с другими зонами мозга, участвующими в мышлении и принятии решений, или посылают команды, чтобы запустить действие.

Короче говоря, интерфейс «мозг — компьютер» может взаимодействовать со многими областями коры, в том числе

с первичными полями коры, которые реагируют на сенсорные сигналы, например на наклон линий в зрительном поле и интенсивность света, попадающего на сетчатку, или на возбуждение, приходящее от периферического нервного окончания. Кроме того, взаимодействие может быть и с ассоциативными областями, тесно связанными с первичной корой и отвечающими за речь, распознавание объектов, эмоции и контроль над выполнением принятых решений.

Несколько групп ученых стали регистрировать у парализованных пациентов сигналы отдельных нейронов, позволяющие управлять протезом в контролируемых лабораторных условиях. Однако перед тем как начать обеспечивать пациентов нейронными протезами так же легко, как кардиостимуляторами, надо решить основные проблемы. В то время как другие лаборатории работают с моторной корой, моя группа сосредоточилась на регистрации сигналов в ассоциативных областях. Таким образом мы надеемся быстро и универсально фиксировать нейронные сигналы, отражающие намерения пациента.

Моя лаборатория изучала конкретную ассоциативную область — заднюю теменную кору (ЗТК), где начинает планироваться будущее движение. Работая с обезьянами, мы обнаружили в ЗТК участок, где фиксируется намерение начать движение глаз, он называется «латеральная внутритеменная кора». Информацию о движении конечностей обрабатывает другой участок в ЗТК. В теменной коре есть также область, куда поступает сигнал, когда планируется совершить движение руками. Кроме того, Хидео Саката (Hideo Sakata) из Медицинской школы Университета «Нихон» обнаружил, что с планированием хватательных движений связана и передняя внутритеменная область.

Использование ЗТК для управления протезом или курсором компьютера имеет несколько возможных преимуществ. В отличие от моторной коры, с которой работают другие лаборатории и где каждое из полушарий отвечает за конечность с противоположной стороны тела, ЗТК контролирует сразу обе руки. Кроме того, ЗТК определяет цель действия. Например, когда обезьяна видит предмет, до которого хочет дотянуться, эта область мозга немедленно включается, фиксируя местоположение желаемого объекта. В свою очередь, моторная кора посылает сигнал о том, какой должна быть

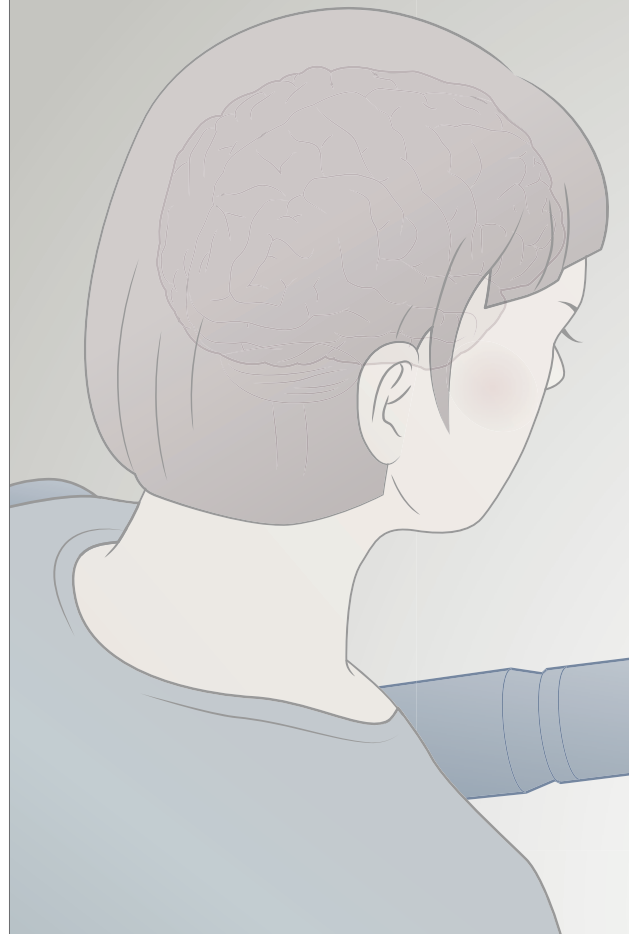
Illustration by AXS Biomedical Animation Studio

Силой мысли

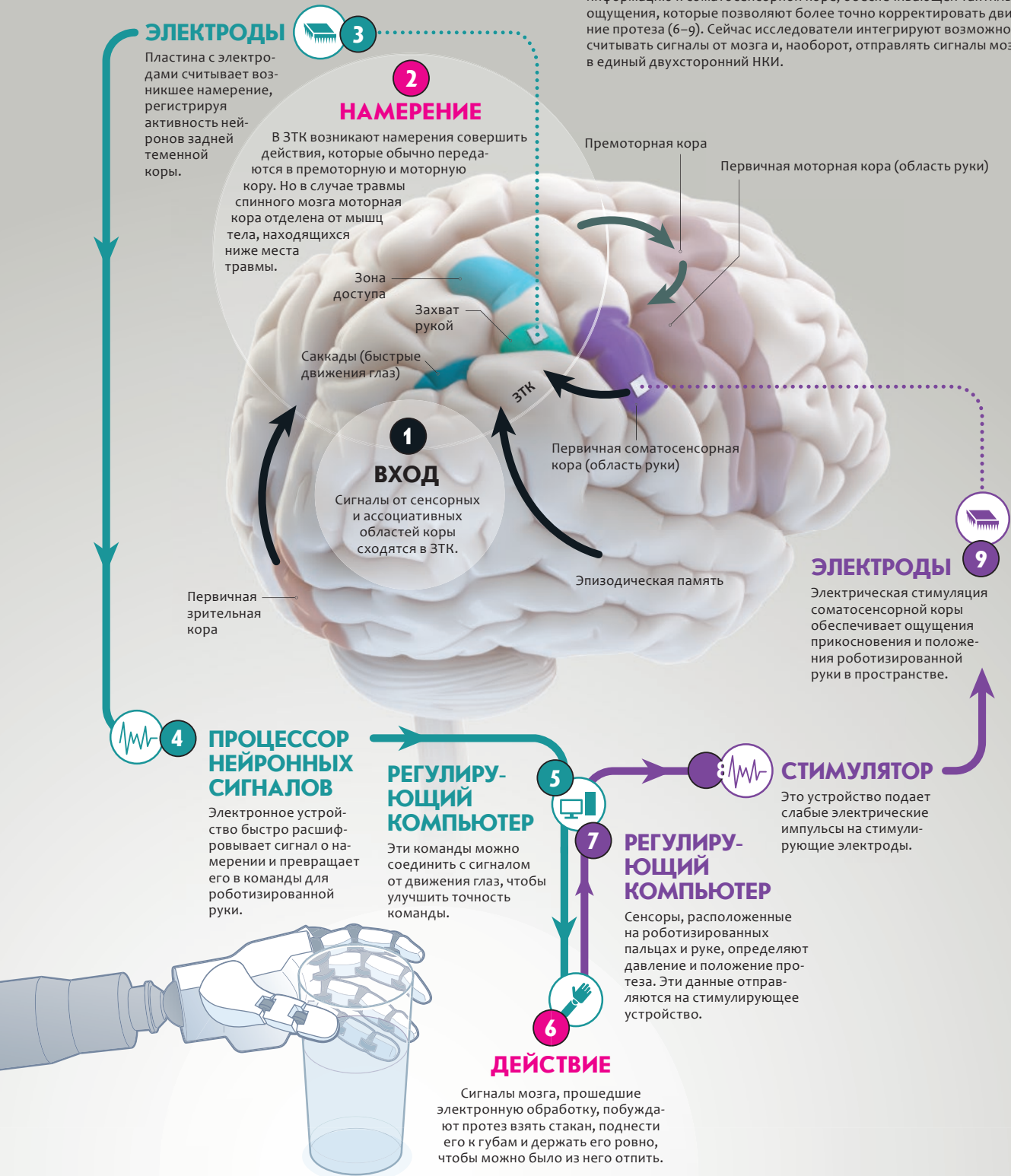
За 15 лет нейробиологи создали нейрокомпьютерные интерфейсы (НКИ), которые позволяют управлять курсором или протезом с помощью сигналов от нервных клеток. Эта технология развивалась медленно, потому что превращение электрической активности нейронов в команду для участия в видеоигре или движения роботизированной рукой — довольно сложный процесс.

Группа ученых из Калифорнийского технологического института попыталась расширить возможности нейропротезирования, подключившись к высокоуровневым нейронным процессам, обеспечивающим намерение совершить действие. Затем соответствующие электрические сигналы передаются на роботизированную руку. В отличие от других лабораторий, где принято использовать для управления протезом сигналы из моторной коры, исследователи из Калтеха поместили электроды в заднюю теменную кору (ЗТК), и на протез передается само намерение действовать.

Для нейробиологов расшифровка нейронных сигналов все еще представляет определенные трудности. Однако использование НКИ, который получает сигнал от верхних уровней мысленной команды, по-видимому, позволяет более быстро и точно контролировать протез.



Лаборатория Ричарда Андерсена в Калифорнийском технологическом институте запустила разработку НКИ, считывающего сигналы мозга о намерении к действию и передающего их на роботизированную руку, которая может захватить стакан и дать попить из него человеку с параличом всех четырех конечностей (1–6). Такой НКИ передает сигнал о положении конечностей, а также осязательную информацию к соматосенсорной коре, обеспечивающей тактильные ощущения, которые позволяют более точно корректировать движение протеза (6–9). Сейчас исследователи интегрируют возможности считывать сигналы от мозга и, наоборот, отправлять сигналы мозгу в единый двухсторонний НКИ.



траектория движения, чтобы дотянуться до предмета. Если известна цель, то НКИ быстро расшифровывает, какое должно быть действие, тогда как на анализ сигнала от моторной коры, содержащего информацию о траектории движения, может потребоваться больше секунды.

Из лаборатории к пациенту

Непросто было перейти от экспериментов на лабораторных животных к изучению ЗТК у человека. Прошло 14 лет, прежде чем мы сделали первый имплантат человеку. Сначала мы вживили здоровым обезьянам точно такие же электроды, как те, которые мы планировали использовать для людей. Затем обезьяны учились управлять курсором на мониторе или роботизированной конечностью.

Имплантация нескольких крошечных пластинок с электродами позволила нам расшифровать большую часть того, что намеревается сделать человек

Мы собрали команду ученых, врачей и реабилитологов из Калифорнийского технологического института, Университета Южной Калифорнии, Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, Национального реабилитационного центра «Ранчо Лос Амигос», больницы и медицинских центров «Каса Колина». Было получено разрешение от Управления по санитарному надзору за качеством пищевых продуктов и медикаментов (FDA) США и от экспертных советов, которые оценивают безопасность и этичность процедур в лабораториях, больницах и реабилитационных центрах.

Доброволец в проектах подобного типа — настоящий первопроходец, неизвестно, получит ли он от этого пользу или нет. Фактически люди участвуют в эксперименте, чтобы помочь будущим пользователям, которые захотят приобрести эту технологию после того, как ее усовершенствуют для повседневного использования. В апреле 2013 г. нейрохирурги Чарлз Лю (Charles Liu) и Брайан Ли (Brian Lee) провели операцию, имплантировав устройство нашему первому добровольцу Сорто. Процедура

прошла безупречно, но затем, прежде чем протестировать устройство, нам надо было дождаться заживления.

Мои коллеги из Лаборатории реактивного движения NASA, построившие и запустившие марсоходы, рассказывали о семи минутах ужаса, когда марсоход входит в атмосферу планеты и садится. У меня такими были две недели тревоги и гадания, будет ли работать имплантат. Мы знали, как функционируют соответствующие участки мозга у обезьян, но имплантируя электроды человеку, мы ступали на неизведанную территорию. Раньше никто никогда не пытался так регистрировать активность популяции нейронов в ЗТК.

В первый день тестирования мы засекли нейронную активность, а к концу недели сигналы шли уже от достаточного количества нейронов, чтобы начать выяснять, сможет ли Сорто управлять роботизированной рукой. Некоторые нейроны изменяли свою активность, когда Сорто представлял себе, как вращает рукой. Его первой задачей было поворачивать роботизированную конечность в разные положения так, чтобы пожать руку аспиранту. Он волновался так же, как и мы, поскольку с момента получения травмы он впервые взаимодействовал с миром через движение механической руки.

Люди часто спрашивают, сколько времени нужно, чтобы научиться пользоваться интерфейсом «мозг — компьютер». На самом деле специального обучения не требуется. Контроль роботизированной руки с помощью мозговых сигналов о намерениях — процесс простой и естественный. Представляя себе различные действия, Сорто мог наблюдать сигналы отдельных нейронов своей коры, включая и выключая их по своему желанию.

В начале исследования мы спрашивали участников, чего бы они хотели достичь, контролируя движения робота. Сорто хотел получить возможность самостоятельно пить пиво, не прося никого о помощи. Он смог освоить этот навык примерно за год. Вместе с возглавляемой ученым Спенсером Келлисом (Spencer Kellis) из Калтеха командой, куда входили робототехники из Лаборатории прикладной физики Университета Джонса Хопкинса, мы объединили сигналы о намерениях Сорто с технологиями машинного зрения и интеллектуальной робототехники.

Алгоритм машинного зрения анализирует информацию от видеокамер, а интеллект

туальная робототехника совмещает сигнал о намерении с компьютерными алгоритмами, чтобы начать движение роботизированной рукой. Когда Сорто за год освоил эту задачу, все присутствующие разразились аплодисментами и радостными криками. В 2015 г. мы опубликовали в *Science* наши первые результаты использования сигналов о намерениях из ЗТК для управления нейронными протезами.

Сорто — не единственный пользователь нашей технологии. Нэнси Смит участвует в исследовании уже четвертый год, она получила тетраплегию в результате автомобильной аварии около десяти лет назад. Смит была преподавателем компьютерной графики в старших классах и любила играть на пианино. В наших исследованиях вместе с ведущими участниками группы Тайсоном Афлало (Tyson Aflalo) из Калтеха и Надером Пуратяном (Nader Pouratian) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе, в ЗТК у Смит мы нашли детальное представительство каждого пальца обеих рук. Используя виртуальную реальность, она смогла представить каждый из десяти пальцев и перемещать влево и вправо виртуальные руки, изображенные на компьютерном экране. Используя воображаемые движения пяти пальцев одной руки, Смит может сыграть простые мелодии на виртуальной клавиатуре.

Как в мозге представлены цели

Мы были в восторге от работы с этими пациентами, поскольку нам удалось обнаружить нейроны, обрабатывающие сигналы, связанные с намерениями. Всего с нескольких сотен нейронов можно было получить ошеломляющий объем информации. Мы смогли расшифровать большое количество когнитивной активности, в том числе изображение движения без попытки его совершить, движения пальцев, решение вспомнить зрительные стимулы, позиции руки для захвата, наблюдаемые действия, глаголы вроде «схватить» или «толкнуть» и математические вычисления. К нашему удивлению, имплантация нескольких крошечных пластинок с электродами позволила нам расшифровать большую часть того, что намеревается сделать человек.

Вопрос, сколько информации можно получить от маленького участка мозговой ткани, напомнил мне схожую научную проблему, с которой я столкнулся в начале своей карьеры. После защиты

диссертации я работал у покойного Вернона Маунткасла (Vernon Mountcastle) в Школе медицины Университета Джонса Хопкинса, мы смотрели, как зрительное пространство представлено в ЗТК у обезьян. Наши глаза — как камеры, а фоточувствительная сетчатка определяет расположение зрительного стимула и передает эту информацию: формируется ретинопическая карта. Нейроны реагируют на сигнал от небольшого участка сетчатки — так называемого рецептивного поля нейрона. Однако зрительное восприятие отличается от видеозаписи. Когда видеочасть перемещается, записываемое изображение также смещается, но когда мы двигаем глазами, мир кажется неизменным. Ретинопическое изображение, поступающее от глаз, должно преобразовываться в визуальное представление пространства, где учитывается, куда смотрят глаза, чтобы, если они начнут двигаться, мир оставался на месте.

ЗТК — основной центр обработки информации для формирования высокоуровневого представления о пространстве. Чтобы дотянуться до объекта и схватить его, мозг должен учитывать, куда смотрят глаза. При повреждении ЗТК люди не могут точно дотянуться до объекта. В лаборатории Маунткасла мы выявили в ЗТК отдельные нейроны, у которых рецептивным полем была часть поля зрения. Те же клетки несут информацию о положении глаз. Эти два сигнала взаимодействуют, так что зрительный сигнал усиливается сигналом от положения глаз; получается то, что называют полем модулирующих воздействий.

Я продолжал заниматься проблемой представления пространства мозгом, когда впервые получил преподавательскую должность в Институте биологических исследований Солка, прямо через дорогу от Калифорнийского университета в Сан-Диего. Я работал с Дэвидом Зипсером (David Zipser), нейробиологом-теоретиком, разрабатывающим нейронные сети в этом университете, и мы написали в *Nature* о вычислительной модели нейронной сети, которая объединяла информацию о положении на сетчатке и о направлении взгляда для создания карты пространства, не меняющейся при движении глаз. Во время обучения нейронных сетей их средние слои формировали поле модулирующих воздействий, так же как ЗТК в экспериментах. Если передавать

сигналы от зрительных входов и о положении глаз на одни и те же нейроны, то достаточно девяти нейронов, чтобы представить все зрительное поле.

Недавно эта идея о смешанном представителе стимулов, то есть о существовании популяций нейронов, реагирующих на несколько переменных, вновь привлекла внимание ученых. Например, при регистрации нейронов в префронтальной коре наблюдается перекрытие информации от двух типов воспоминаний и различных зрительных объектов.

Кроме того, данная работа помогает объяснить, что происходит в ЗТК. Мы обнаружили это, когда с помощью набора письменных инструкций попросили Смит выполнить восемь различных пар заданий. В одном случае требовалось разработать стратегию, чтобы вообразить или осуществить действие, в другом надо было использовать правую и левую стороны тела, в третьем — сжать руку или пожать плечами. Мы обнаружили, что нейроны в ЗТК объединяют все переменные и при этом наблюдается специфическая активность, отличающаяся от случайных взаимодействий, которые мы и другие исследователи наблюдали в экспериментах на лабораторных животных.

Популяции нейронов, активных при формировании стратегии и при управлении каждой из сторон тела, перекрываются. Если нейрон работает, чтобы инициировать движение левой руки, скорее всего, он отреагирует и на попытку движения правой, однако группы нейронов, контролирующие плечи и ладони, разделены между собой сильнее. Мы назвали это частично перекрывающейся специализацией (*partially mixed selectivity*). Затем мы обнаружили похожую картину для слов, обозначающих движения. Активность клеток, связанных со схожими действиями, может перекрываться. Нейрон, реагирующий на видео, где человек хватается объект, вероятно, будет активироваться и в том случае, когда человек читает слово «хватать». Но клетки, реагирующие на такое действие, как нажатие, скорее всего, будут относиться к другой группе. Как правило, частично перекрывающееся кодирование имеет место там, где требуются схожие вычисления (движения левой рукой такие же, как движения правой). При этом разделяются те действия, где нейронная обработка различается (движения плеча отличаются от движений кисти).

Перекрывающееся и частично перекрывающееся кодирование было обнаружено в некоторых участках ассоциативной коры, и в последующих исследованиях предстоит выяснить, встречается ли оно в других участках, отвечающих за речь, распознавание объектов и исполнительный контроль. Кроме того, хотелось бы знать, используют ли первичные сенсорные или моторные зоны аналогичную частично перекрывающуюся структуру.

Другая ближайшая цель — выяснить, насколько обучение добровольцев новым задачам может повлиять на эффективность использования протеза. Если обучение происходит легко, то в любую область мозга можно внедрить имплантат и обучить любой возможной задаче. Имплантат в первичной зрительной коре можно будет научить выполнению задач, не связанных со зрением. Но если обучение более ограничено, то с имплантатом, например, в моторной области можно обучиться только двигательным задачам. Пока известно лишь, что имплантат можно помещать в области, про которые было показано, что они контролируют конкретную когнитивную деятельность.

Ощущения при письме

Нейрокомпьютерный интерфейс должен не только получать и обрабатывать сигналы от мозга, но и посылать обратную связь от протеза в мозг. Когда мы тянемся, чтобы взять предмет, визуальная обратная связь помогает направить руку к цели. Положение руки зависит от формы предмета, который надо схватить. Если рука, начав манипулировать предметом, не получает сигналов о положении и о касании, качество выполнения быстро ухудшается.

Для наших добровольцев с повреждениями спинного мозга, не способных пошевелиться, очень важно найти способ исправить отсутствие такой чувствительности. Кроме того, они не воспринимают тактильные ощущения и положение тела в пространстве, а это необходимо для плавных движений. Таким образом, идеальный нейронный протез должен компенсировать отсутствие сигналов в обоих направлениях: он должен передавать намерение добровольца и воспринимать информацию о прикосновении и позе, поступающую от датчиков роботизированной конечности.

Роберт Гонт (Robert Gaunt) с коллегами из Питтбургского университета решили

эту проблему, имплантировав пациенту с тетраплегией наборы микроэлектродов в соматосенсорную кору, туда, где обрабатываются сигналы от прикосновения к конечностям. Сотрудники Гонга подавали слабый электрический ток на микроэлектроды, и пациент сообщал об ощущениях от разных участков поверхности руки.

Мы тоже использовали такие имплантаты в участке соматосенсорной коры, отвечающем за руку. И были приятно удивлены, когда один наш пациент сообщил о наличии естественных ощущений, таких как сжатие, постукивание и вибрация на коже, то есть у него появилась кожная чувствительность. Кроме того, он почувствовал движение конечности — это ощущение называется «проприорецепция». Эксперименты показали, что люди, потерявшие чувствительность конечностей, могут восстановить ее с помощью НКИ, который регистрирует восприятие. Следующий шаг — использовать роботизированные руки с сенсорами, чтобы проверить, улучшит ли соматосенсорная обратная связь ловкость контролируемой мозгом руки. Помимо этого, мы хотели бы выяснить, ощутит ли пациент чувство слияния с роботизированной рукой, станет ли она частью его тела.

Другая важная задача — усовершенствование электродов для приема и передачи нервного сигнала. Мы знаем, что имплантат функционирует довольно долго, как минимум на протяжении пяти лет. Однако улучшив электроды, можно было бы сделать эти системы еще более долговечными и увеличить количество регистрируемых нейронов. Другая задача — увеличение длины тончайших электродных шипов, что позволило бы получить доступ к областям, расположенным в складках коры.

Гибкие электроды, которые вместе с мозгом перемещаются при легких толчках во время изменения кровяного давления или при обычном дыхательном цикле, позволяют сделать регистрацию более стабильной. Использующиеся сейчас электроды требуют перекалибровки декодера, поскольку они изо дня в день немного меняют свое положение относительно нейронов, а исследователи хотели бы в итоге следить за активностью одних и тех же нейронов в течение недель и месяцев.

Имплантаты должны быть меньших размеров, работать на слабых токах (чтобы не перегревать мозг) и без проводов, чтобы не требовалось никаких кабелей для

подключения установки к мозгу. Все существующие сейчас НКИ нужно имплантировать с помощью хирургической операции. Но мы надеемся, что однажды будут созданы регистрирующие и стимулирующие интерфейсы, которые смогут принимать и посылать сигналы через череп, а также иметь производительность, не уступающую современным, вживляемым хирургически.

Конечно, НКИ создаются, чтобы помочь парализованным людям. Однако научно-фантастические книги, фильмы и средства массовой информации сосредоточили внимание на возможности использовать технологии для расширения ресурсов, получении «сверхчеловеческих» способностей, которые позволят человеку бежать быстрее и прыгать выше. Но улучшение способностей станет возможным, только когда будут разработаны неинвазивные технологии для точного улавливания активности отдельных нейронов.

И, наконец, я хочу сказать о том удовлетворении, которое получил, проводя фундаментальные исследования и используя их на благо пациентов. Фундаментальная наука необходима для накопления знаний и развития медицины. Исследования получают свою полную реализацию, когда научные открытия используются в клинике. Ученый испытывает чувство глубокого личного удовлетворения, разделяя с пациентом его восторг от возможности двигать роботизированной конечностью, чтобы снова начать взаимодействовать с внешним миром. ■

Перевод: М.С. Багоцкая

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Оуэн А. Есть тут кто живой? // ВМН, № 7–8, 2014.
- Reach and Grasp by People with Tetraplegia Using a Neurally Controlled Robotic Arm. Leigh R. Hochberg et al. in Nature, Vol. 485, pages 372–375; May 17, 2012.
- High-Performance Neuroprosthetic Control by an Individual with Tetraplegia. Jennifer L. Collinger et al. in Lancet, Vol. 381, pages 557–564; February 16, 2013.
- Decoding Motor Imagery from the Posterior Parietal Cortex of a Tetraplegic Human. Tyson Aflalo et al. in Science, Vol. 348, pages 906–910; May 22, 2015.
- Intracortical Microstimulation of Human Somatosensory Cortex. Sharlene N. Flesher et al. in Science Translational Medicine, Vol. 8, No. 361, Article No. 361ra141; October 19, 2016.
- Proprioceptive and Cutaneous Sensations in Humans Elicited by Intracortical Microstimulation. Michelle Armenta Salas et al. in eLife, Vol. 7, Article No. e32904; April 10, 2018.