

Джо Цинь

КОД ПАМЯТИ



Исследователи приближаются к пониманию закономерностей формирования памяти в мозге. Расшифровка кода памяти позволит создать более интеллектуальные компьютеры и даже читать человеческие мысли

Каждый, кому довелось пережить землетрясение, хранит об этом яркие воспоминания: земля качается, дрожит, выгибается и вздымается; все вокруг наполнено грохотом, треском и звоном бьющегося стекла; шкафы раскрываются; книги, посуда и безделушки летят с полок. Даже по прошествии многих лет мы помним эти моменты с потрясающей четкостью, поскольку именно таково предназначение нашего мозга, обретенное в ходе эволюции: извлекать информацию из заметных событий и в дальнейшем пользоваться знаниями в похожих ситуациях. Возможность накапливать опыт позволяет животным адаптироваться к нашему сложному и изменчивому миру.

Уже не одно десятилетие ученые пытаются понять, каким образом в мозге формируется память. Объединив новые эксперименты с мощным математическим анализом и возможностью одновременно регистрировать активность более чем 200 нейронов в мозге бодрствующей мыши, мы обнаружили то, что, по нашему мнению, представляет собой фундаментальный мозговой механизм извлечения жизненно важной информации из личного опыта и записи ее в память. Результаты исследований показывают, что линейного потока сигналов от одного нейрона к другому не достаточно, чтобы объяснить, как в мозге реализуются восприятие и память, — для этого необходима координированная активность больших популяций нейронов.

Более того, обнаружено, что популяции нейронов, участвующие в кодировании памяти, выделяют обобщенные концепции, позволяющие нам трансформировать отдельные впечатления в отвлеченное знание. Результаты нашей работы приближают биологов к расшифровке универсального нервного кода, т.е. правил, которым следует мозг, превращая электрические импульсы в восприятие, память, знание и, в конечном счете, в поведение. Понимание данного механизма позволит разработать более естественный интерфейс между мозгом и машиной, сконструировать совершенно новое поколение интеллектуальных компьютеров и роботов и, возможно, даже создать устройство для чтения мыслей человека путем регистрации активности его нейронов.

Мыши Дуги

Осенью 1999 г. мы вывели линию мышей с улучшенной памятью. Эти умные животные, названные Дуги в честь находчивого молодого доктора в телесериале «Дуги Хаузер» (*Doogie Houser*), быстрее обучаются и лучше запоминают информацию, чем их дикие собратья. Данная работа вызвала большой интерес, породила множество споров, и даже попала на обложку журнала *Time*. Однако сделанные нами открытия оставили без ответа принципиальный вопрос: что же такое память?

Известно, что превращение перцептивного опыта в долговременную память требует участия области мозга под названием гиппокамп.

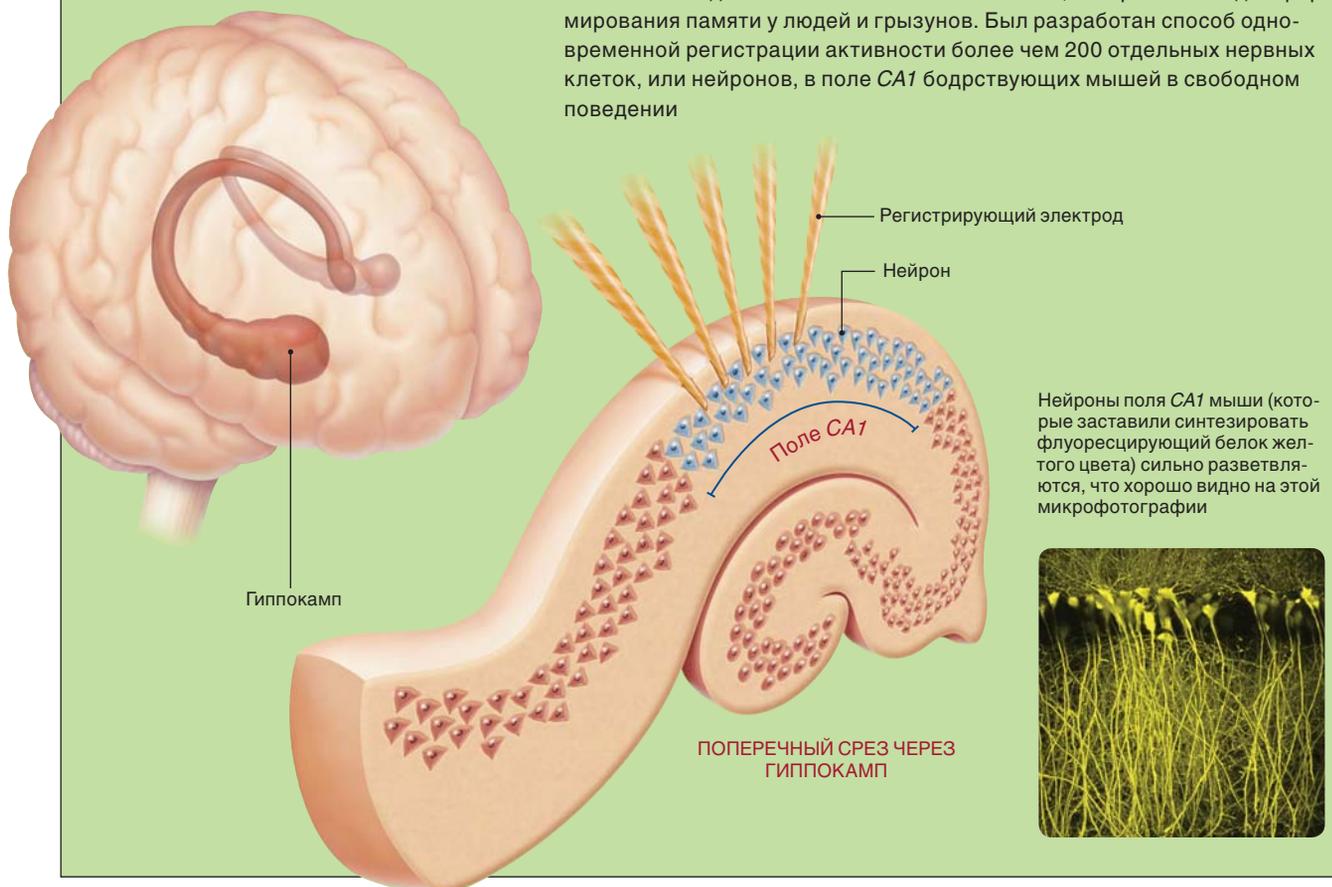
ОБЗОР: РАСШИФРОВАТЬ КОД ПАМЯТИ

- Согласованная работа больших популяций нейронов обеспечивает формирование памяти.
- Подгруппы популяций (нейронные клики) в гиппокампе мыши реагируют на различные аспекты события. Некоторые отображают абстрактную, отвлеченную информацию о ситуации, в то время как другие указывают на более конкретные детали.
- Иерархическая организация, используемая при формировании памяти, применяется мозгом в процессе превращения электрических импульсов нервных клеток в восприятие, знание и поведение. Если это так, то исследование памяти приближает нас к расшифровке универсального нейронного кода, т.е. правил, которые мозг использует для идентификации и осмысления воспринятых впечатлений.
- Автор перевел запись активности нейронных кликов в двоичный код. Такое цифровое представление сигналов мозга может заложить основу для создания инструмента, способного фиксировать мысли и впечатления, а также сравнивать их.

TOM DRAPER DESIGN; IMAGESHOP/CORBIS (photograph)

МЕСТОНАХОЖДЕНИЕ ПАМЯТИ

Ученые исследовали гиппокамп и его поле CA1, которое важно для формирования памяти у людей и грызунов. Был разработан способ одновременной регистрации активности более чем 200 отдельных нервных клеток, или нейронов, в поле CA1 бодрствующих мышей в свободном поведении



Нам было известно, какие молекулы критически необходимы для данного процесса — в их числе рецептор НМДА, воздействуя на который, мы получили мышей Дуги. Но никто в точности не знал, как именно активация нервных клеток несет в себе память. Несколько лет назад я задался вопросом: нельзя ли найти способ описания памяти на математическом или физиологическом уровне? Вдруг нам удастся выявить соответствующую динамику нервных сетей и уловить закономерности в активности, возникающей при формировании памяти? И не сможем ли мы выделить те организующие принципы, которые позволяют нейронным популяциям определять и сохранять самые важные детали нашего опыта?

Для того чтобы исследовать нервный код памяти, прежде всего было необходимо разработать более

совершенное оборудование для регистрации деятельности мозга. Мы хотели продолжать работать с мышами отчасти для того, чтобы иметь возможность провести эксперименты на зверьках с генетически измененными способностями к обучению и запоминанию, таких как умные мыши Дуги и их мутантные братья с нарушенной памятью. Исследователи имеют возможность наблюдать за активностью сотен нейронов на примере бодрствующих обезьян, однако при наблюдениях за грызунами удавалось записать максимум 20—30 клеток одновременно — главным образом потому, что мозг мыши по размеру не больше арахисового орешка. Поэтому мы создали регистрирующее устройство, позволявшее нам следить за активностью значительно большего числа отдельных нейронов на примере бодрствующей мыши в свободном поведении.

Затем мы обратились к способности мозга запоминать важные события, которые влияют на жизнь индивида. Свидетели террористического акта 11 сентября, люди, выжившие при землетрясении или даже посетители диснеевской Башни ужаса, испытывающие падение с высоты 13-этажного дома, — все они никогда уже не смогут забыть о пережитом. Поэтому мы разработали процедуры, имитирующие эти эмоционально окрашенные эпизоды. Переживание подобных впечатлений должно оставить глубокий и длительный след в памяти. А кодирование выраженной памяти, по нашему предположению, вовлекает в процесс большое количество клеток гиппокампа. В результате мы с большей вероятностью сможем обнаружить клетки, активирующиеся в связи с данным событием, и собрать достаточно данных, чтобы раскрыть закономерности этого процесса.

ALICE Y. CHEN (Illustrations); M. FUHRMANN AND JOACHEM HERMS Center for Neuropathology and Prion Research, Ludwig Maximilians University Munich (micrograph)

Мы остановили свой выбор на лабораторной имитации землетрясения (трясли небольшой контейнер с мышью внутри), нападения совы (резкая струя воздуха, направленная в спину животного) и кратковременного вертикального свободного падения внутри миниатюрного «лифта» (в качестве которого мы взяли коробку из-под печенья). Грызуны были подвергнуты такому воздействию семь раз с промежутками в несколько часов. Как во время самих событий, так и в периоды покоя мы регистрировали активность 260 нейронов поля CA1 гиппокампа — области, играющей ключевую роль в формировании памяти как у животных, так и у людей.

Удивительные паттерны

Далее мы попытались выделить паттерны, в которых могла бы быть закодирована память о произошедших пугающих событиях. Мы проанализировали записи с помощью мощных методов распознавания паттернов, в особенности множественного дискриминантного анализа (МДА), позволяющего свернуть многомерную задачу (например, активность 260 нейронов до и после события дает пространство с 520 измерениями) в трехмерное графическое пространство. К неудовольствию биологов, полученные оси не соотносятся ни с какой мыслимой мерой нейронной активности, однако они создают математическое пространство, в котором есть свое место для каждого паттерна нейронной активности.

Когда мы отобразили совокупные реакции всех зарегистрированных нейронов одного животного на полученное трехмерное пространство, сразу проявились четыре отдельных «пузыря»: один был связан с покоем, один с землетрясением, один со струей воздуха и еще один с падением в лифте. Таким образом, каждый из наших пугающих эпизодов проявлялся в виде самостоятельного паттерна активности нейронов поля CA1. Мы полагаем, что данные паттерны отражают интегрированную информацию о перцептивных,

эмоциональных и фактических аспектах событий.

Чтобы увидеть, как паттерны меняются в динамике, мы применили технику «скользящего окна» к данным регистрации активности нейронов каждого животного на протяжении нескольких часов, и выполняли МДА последовательно для каждого полусекундного окна. В результате удалось увидеть, как паттерн активности менялся по мере формирования следа памяти о каждом событии. Например, мы наблюдали, как вначале у мыши, подвергнутой землетрясению, активность нейронных ансамблей находилась в пузыре покоя, потом резко перемещалась в пузырь землетрясения и затем снова возвращалась в состояние покоя, проходя при этом по характерной треугольной траектории.

Вначале у животного, подвергнутого землетрясению, активность нейронных ансамблей находилась в пузыре покоя, потом резко перемещалась в пузырь землетрясения и затем снова возвращалась в состояние покоя

Обнаружилось нечто еще более интересное: паттерны активности, связанные с пугающими происшествиями, снова спонтанно возникали через секунды или минуты после фактического события. Повторные «проигрывания» демонстрировали сходные траектории, в том числе с той же геометрической формой, однако обладали меньшей амплитудой в сравнении с исходной реакцией. Повторное возникновение таких паттернов активности свидетельствует о том, что информация, проходящая через гиппокампальную систему, уже была зафиксирована в нервных цепочках — и мы наблюдаем воспоминание о прошедшем событии. Качественное и количественное измерение спонтанной реактивации паттернов кодирования памяти дает возможность наблюдать консолидацию недавно сформированных следов памяти в долговременную память и изучать, что

происходит с данными процессами у умных мышей и грызунов с нарушенным обучением.

Клики приходят к власти

Научившись различать паттерны, характерные для конкретных видов памяти, мы попытались понять, как «прослушиваемые» нами нейроны совместно работают при кодировании различных событий. Соединив МДА с другим математическим методом — иерархическим кластерным анализом, мы обнаружили, что паттерны генерируются разными подгруппами нейронов, получившими название «нейронные клики». Это группы нейронов, которые отвечают сходным образом на некоторое определенное событие и совместно выступают в качестве единой кодирующей единицы высокой надежности.

Более того, было выявлено, что каждое конкретное событие всегда отображается некоторой группой кликов, кодирующих различные аспекты. Так, землетрясение активизирует подгруппу нейронов испуга как такового, а также вторую клику, которая отвечает лишь за события,

ОБ АВТОРЕ

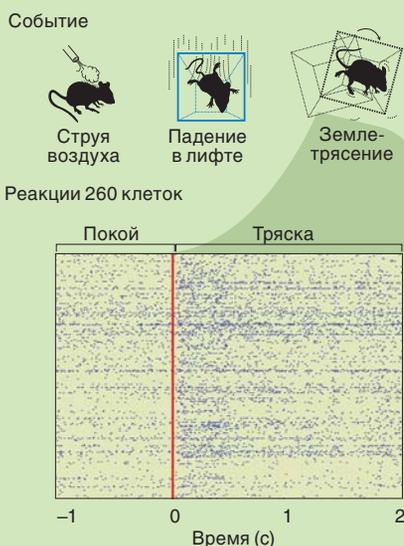
Джо Цинь (Joe Z. Tsien) — профессор фармакологии и биомедицинской инженерии, а также директор Центра системной нейробиологии в Бостонском университете. Цинь получил широкую известность в 1999 г., когда, работая в Принстонском университете, создал линию умных «мышей Дуги». В 2004 г. он перешел в Бостонский университет, а недавно основал Шанхайский институт функциональной геномики мозга при Восточно-Китайском нормальном университете.

ПЕРВЫЕ ШАГИ К РАЗГДКЕ КОДА ПАМЯТИ

Чтобы приблизиться к пониманию мозгового кода памяти, исследователи анализировали сигналы мозга с помощью новаторских методов

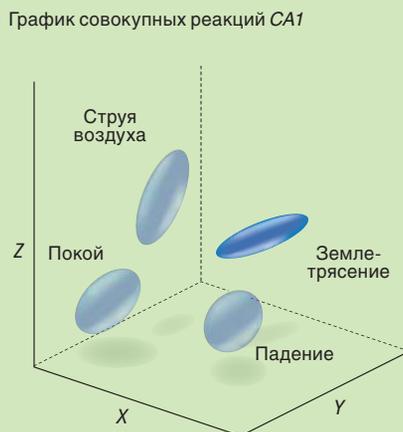
1 РЕГИСТРАЦИЯ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ

Для мышей было создано три пугающие ситуации — струя воздуха в спину («нападение совы»), падение в контейнере («падающий лифт») и тряска в клетке («землетрясение»). При этом регистрировался разряд большого количества нейронов поля CA1. Каждый ряд точек показывает импульсы одной клетки (запись во время землетрясения)



2 ПРИМЕНЕНИЕ АЛГОРИТМОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБРАЗОВ

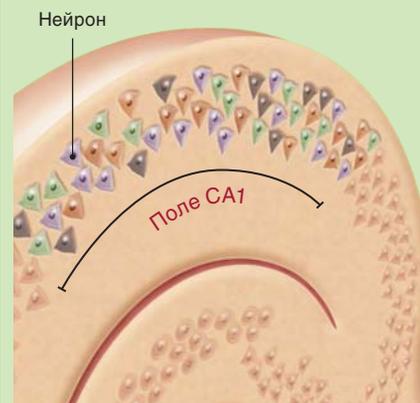
С помощью компьютерных программ были построены трехмерные графики, отображающие активность всего ансамбля записанных нейронов животного в покое и во время пугающего события. Такие графики позволяли «читать», что происходит с животным, просто наблюдая за перемещением регистрируемого сигнала в трехмерном пространстве



3 ОБНАРУЖЕНИЕ КОДИРУЮЩИХ КЛИК

Дальнейший анализ показал, что нейронные ансамбли, активные во время события, включают подгруппы — «нейронные клики». Все клетки в одной клике демонстрируют сходные паттерны разряда и не входят в состав других клик

Схематическое изображение клик, кодирующих восприятие землетрясения (каждая клика обозначена своим цветом)



связанные с нарушением положения в пространстве (и при землетрясении, и при падении в лифте); третья клика активируется исключительно тряской, а четвертая указывает на место, в котором произошло событие. Таким образом, информация об этих эпизодах представлена ансамблями нейронных клик, всегда организованных иерархически (от общего к частному). Мы представляем себе иерархическую организацию такой системы в виде пирамиды, основание которой кодирует общие характеристики (например, «пугающее событие»), а вершина представляет более частную информацию (например, «тряска» или «тряска в черной коробке»).

Поле CA1 гиппокампа получает входы от многих областей мозга и сенсорных систем, и специфика конкретных входов определяет,

какой тип информации кодирует каждая конкретная клика. Например, клика, реагирующая на все три пугающие события, вероятно, интегрирует информацию из миндалины (она отвечает за эмоции, такие как страх или чувство новизны), и потому кодирует, что «данные события являются пугающими». С другой стороны, подгруппы нейронов, активируемые только землетрясением и падением в лифте, могут обрабатывать входы от вестибулярной системы (она передает информацию о нарушении положения в пространстве), и таким образом кодирует, что «при этих событиях я теряю равновесие». Аналогично те клики, которые реагируют только на определенное событие, происходящее в конкретном месте, могут интегрировать дополнительные входы от так называемых

нейронов места (клеток, разряжающихся в те моменты, когда животное перемещается через знакомые ему места в окружающей среде), и тем самым кодируют, что «это событие произошло в черном контейнере».

Дорога к знанию

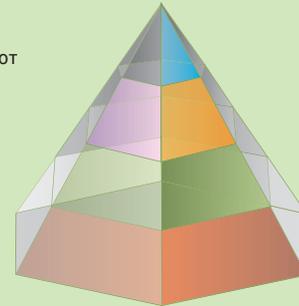
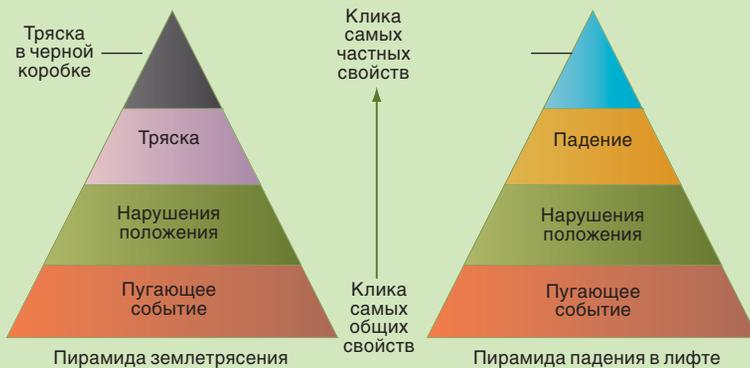
Полученные результаты указывают на ряд организующих принципов кодирования памяти. Прежде всего, мы полагаем, что нейронные клики выступают в качестве функциональных кодирующих единиц, обеспечивающих память и обладающих достаточно высокой надежностью, чтобы отображать информацию даже в том случае, если какой-либо отдельный нейрон в их составе изменит свою активность. С помощью кодирующих нейронных клик мозг запоминает и воспроизводит

ALICE Y. CHEN (1, 3); LUCY READING-IRKANDA (2, 4, 5)



4 ВЫЯВЛЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИИ ПАМЯТИ

Другой анализ показал, что каждая клика кодирует свой аспект воспринятого события, от отвлеченных до конкретных его свойств. Исследователи представляют себе такую иерархическую организацию в виде пирамиды, в которой клики, кодирующие наиболее общие свойства, расположены в ее основании



Многогранник пугающего события

Каждая пирамида может быть частью многогранника, представляющего все события данной категории, как, например, «все пугающие события»

5 ПЕРЕВОД АКТИВНОСТИ МОЗГА В ДВОИЧНЫЙ КОД

Затем исследователи представили активность нейронных клик в виде строк двоичного кода, описывающих событие. На показанных фрагментах строк 1 означает активность данной клики, а 0 – ее отсутствие. Двоичное представление нейронной активности может оказаться полезным во многих областях, в том числе оно может помочь заглянуть в мысли тех, кто лишен способности говорить, или же помочь в разработке роботов, управляемых силой мысли

Клика	Испуг	Движение	Струя воздуха	Падение	Тряска
Двоичный код землетрясения	1	1	0	0	1
Двоичный код падения в лифте	1	1	0	1	0

различные аспекты одного и того же события и располагает информацией, относящуюся к одному и тому же эпизоду, в виде пирамиды с иерархическими организованными уровнями. Каждую такую пирамиду можно представить себе в виде части многогранника, который отображает всю совокупность событий, попадающих в данную категорию, — например «все пугающие события».

Такой комбинаторный иерархический способ формирования памяти позволяет мозгу генерировать неограниченное количество уникальных сетевых паттернов, отображающих неисчислимое количество впечатлений. Примерно так же всего из четырех «букв» (нуклеотидов ДНК) составляется практически бесконечное количество различных генов, обеспечивающих разнообразие организмов на Земле. И поскольку

код памяти является категориальным и иерархическим, то отображение новых воспринятых событий может быть основано на простой замене конкретных клик. Таким образом, можно было бы обозначить, что собака, лающая за забором, на этот раз оказалась не немецкой овчаркой, а пуделем, или что землетрясение произошло в Калифорнии, а не в Индонезии.

Каждая пирамида включает в себя подгруппы нейронов, обрабатывающие абстрактную информацию; это подтверждает представление о том, что мозг отнюдь не служит устройством, буквально регистрирующим детали каждого конкретного события. Вместо этого нейронные клики системы памяти позволяют мозгу кодировать ключевые черты конкретных эпизодов и в то же самое время извлекать из них общую

ЧТО ДАЛЬШЕ?

Автор надеется в своей дальнейшей работе рассмотреть следующие вопросы

- Кодируют ли субпопуляции нейронов в пределах клики различные аспекты события?
- Различаются ли следы памяти сразу после события и по прошествии значительного времени? Откуда возникает ложная память?
- Можно ли использовать двоичный код, выделенный из электрической активности мозга, для передачи памяти и мыслей прямо в компьютер, для управления роботами или для контроля над процессом обучения в реальном времени?

ДЛЯ ВАС – БЛЮДЦЕ, ДЛЯ МЕНЯ — ГНЕЗДО

Некоторые нейронные клики в гиппокампе кодируют абстрактные представления. Оказалось, что отдельные нейроны мышей реагируют на предметы различной формы и текстуры лишь при условии, что в них имеется доступное углубление, позволяющее использовать их в качестве гнезда. Закройте углубление, и клетки перестанут реагировать



Мышь наслаждается покоем в блюдце, которое принимает за гнездо

информацию. Такая способность генерировать абстрактные концепции и знания на основе эпизодических событий представляет собой квинт-эссенцию нашего разума и позволяет нам решать новые задачи в постоянно меняющемся мире.

Возьмем для примера понятие «кровать». Зайдя в любой гостиничный номер в любой стране мира, мы сразу ее узнаем, даже если никогда ранее именно эту кровать не видели. Структура ансамблей позволяет нам сохранять в памяти не только образ одной конкретной кровати, но также и общее представление о предмете. Мы нашли подтверждение этому в опытах на мышах. В ходе экспериментов было случайно обнаружено, что небольшое количество нейронов гиппокампа реагировало на абстрактное представление о «гнезде». Эти клетки интенсивно отвечали на гнезда любых типов независимо от того, были ли они круглыми, квадратными или треугольными, сделанными из хлопка, пластмассы или дерева. Однако стоило прикрыть предмет куском стекла, так что животное продолжало видеть гнездо, но уже не могло в него забраться, — и разряд клеток прекращался. Мы заключили, что клетки реагируют не на конкретные физические свойства гнезда (внешний вид, форму или материал), а на его функцио-

нальность (место, где можно свернуться калачиком и поспать).

Категориальная и иерархическая организация нейронных кликов представляет собой не только общий механизм кодирования памяти, но также служит для обработки и представления информации в других областях мозга: от сенсорного восприятия до сознательного мышления. Имеются некоторые факты, подтверждающие данное предположение. Например, в зрительной системе были обнаружены нейроны, реагирующие на «лица», в том числе на лица людей, обезьян и даже на маски. Выявлены также клетки, откликающиеся на определенные типы лиц. В гиппокампе при изучении пациентов с эпилепсией обнаружена популяция клеток, повышающих частоту разряда при предъявлении изображений известных людей. Ицхак Фрид (Itzhak Fried) из Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе столкнулся с удивительным явлением: одна клетка в гиппокампе его пациента реагировала только на актрису Холли Берри (Halle Berry). (Вероятно, эта клетка входит в клику Холли Берри!) В совокупности такие исследования показывают, что иерархическая организация единиц обработки информации от общего к частному представляет собой общий принцип работы мозга.

ЧТЕНИЕ МЫСЛЕЙ

Если бы удалось одновременно зарегистрировать достаточное количество нейронов человека, то такая запись позволила бы прочесть его мысли.

Разумеется, данная технология может иметь практическое применение лишь в том случае, если она будет неинвазивной. Существующие в настоящее время методы, такие как ЭЭГ и ЯМР-томография, для этого недостаточно чувствительны. Они воспринимают усредненные сигналы или регистрируют потребление кислорода одновременно в миллионах нервных клеток.

Если бы существовал сверхточный метод, его можно было бы использовать для того, чтобы определить, способен ли думать человек, по внешним признакам находящийся в вегетативном состоянии, или понимает ли речь пациент с болезнью Альцгеймера, потерявший способность говорить. Чтение мыслей было бы также полезно при диагностике психических заболеваний или для оценки эффективности действия лекарств. Можно было бы создать и более надежные детекторы лжи.

Однако при этом возникнут серьезные моральные, философские и социальные вопросы. Возможно, каждому из нас интересно узнать мысли других людей, но кто из нас захочет, чтобы его собственные мысли читал кто-то другой?

Вспомнить 11001?

Работа с мышами дала нам возможность сравнить паттерны активности в мозге разных животных и даже передавать информацию из мозга в компьютер. С помощью математической процедуры под названием «обращение матриц» мы смогли перевести активность ансамблей нейронных кликов в строки двоичного кода, в которых 1 соответствует активному состоянию и 0 — неактивному. Например, память о землетрясении можно записать как «11001», где первая 1 соответствует активации кликов испуга, вторая 1 — клике, реагирующей на нарушение положения в пространстве, первый 0 указывает на отсутствие активности в клике воздушной струи, второй 0 —

МОЛЕКУЛЫ ПАМЯТИ

В 1949 г. канадский психолог Дональд Хебб (Donald O. Hebb) заявил, что память образуется при взаимодействии двух нервных клеток, приводящем к усилению передачи сигнала через синапс. Однако лишь в 1980-х гг. ученые смогли увидеть правило Хебба в действии. Стимулируя электродами пары нейронов в срезе гиппокампа, Холгер Вигстром (Holger Wigstrom) из Гетеборгского университета в Швеции обнаружил, что активация пресинаптического нейрона (посылающего сигнал) одновременно с постсинаптическим нейроном (принимаящим сигнал) вела к повышению эффективности синапса: постсинаптический нейрон начинал активнее отвечать на прежнюю стимуляцию пресинаптического нейрона. Исследователи предположили, что НМДА-рецепторы — белковый комплекс, расположенный в мембране постсинаптического нейрона, — работают как детектор совпадения.

Чтобы проверить эту гипотезу, мы решили генетически изменить одну из разновидностей НМДА-рецепторов. Было показано, что взрослые мыши, лишённые НМДА-рецепторов в гиппокампе, имели серьёзный дефицит памяти. Нам удалось продемонстрировать и противоположное: когда мы заставили клетки усилить синтез одной из субъединиц НМДА-рецептора (известной как *NR2B*) в гиппокампе и коре, то мыши в получившейся линии (которых мы назвали Дуги) быстрее обучались и лучше запоминали, чем обычные грызуны.

Мы полагаем, что активация НМДА-рецепторов, а также повторная их активация обеспечивает запись паттернов активности нейронных клик, кодирующих память, обеспечивая тем самым связывание следов памяти от молекулярного до сетевого уровней.

в клике падения в лифте, и последняя 1 обозначает активацию клики землетрясения. Мы применили аналогичный двоичный код к активности нейронных ансамблей у четырех мышей и смогли предсказать с вероятностью до 99%, какое событие произошло с каждой из них и где. Другими словами, с помощью математики мы смогли читать мысли этих животных.

На основе подобного двоичного кода возможно создать универсальную систему отсчета для изучения мышления у различных видов животных. Такой код позволит разработать более полноценный интерфейс взаимодействия мозга с машиной в реальном времени. Например, мы создали устройство, которое преобразует нейронную активность мыши, испытывающей землетрясение, в сигнал, открывающий дверцу и позволяющий ей вылезти из трясущегося контейнера. Мы убеждены, что наш подход обеспечивает альтернативный, более интуитивный метод управления такими устройствами, которые уже сейчас позволяют больным людям с нейроимплантатами управлять курсором на экране компьютерного монитора,

а обезьянам — оперировать механической рукой на основе сигналов, регистрируемых из моторной коры. Более того, обработка мозговых кодов памяти в реальном времени когда-нибудь позволит загрузить человеческую память непосредственно в компьютер и хранить ее в цифровом виде неограниченное время.

Совместно со специалистами в области компьютерных технологий мы начинаем применять полученные нами знания об организации мозговой системы памяти к разработке совершенно нового поколения интеллектуальных компьютеров, поскольку существующие сегодня машины оказываются абсолютно бессильны перед многими когнитивными задачами, совершенно не затрудняющими человека (например, узнать своего одноклассника, хотя он отрастил бороду и постарел на 20 лет). Когда-нибудь интеллектуальные компьютеры и машины, оснащенные сложными сенсорами и обладающие логической архитектурой, смогут не только имитировать мышление человека, но и превзойдут его в способности решать сложные когнитивные задачи.



Мышь Дуги

Правда, если наша память, эмоции, знания и воображение могут быть переведены на язык единичек и нулей, то неизвестно, какие последствия ждут нас в будущем. Не случится ли так, что через 5 тыс. лет мы сможем переносить свой разум в компьютер, путешествовать в далекие миры и жить в виртуальных сетях вечно? ■

Перевод: Б.В. Чернышев

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА

- The Oxford Handbook of Memory. E. Tulving and F.I.M. Craik. Oxford University Press, 2000.
- Identification of Network-Level Coding Units for Real-Time Representation of Episodic Experiences in the Hippocampus. L. Lin, R. Osan, S. Shoham, W. Jin, W. Zuo and J. Z. Tsien in Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Vol. 102, No. 17, pages 6125–6130; April 26, 2005.
- Organizing Principles of Real-Time Memory Encoding: Neural Clique Assemblies and Universal Neural Codes. L. Lin, R. Osan and J. Z. Tsien in Trends in Neurosciences, Vol. 29, No. 1, pages 48–57; January 2006.
- Neural Encoding of the Concept of Nest in the Mouse Brain. L. Lin, G. Chen, H. Kuang, D. Wang and J. Z. Tsien in Proceedings of the National Academy of Sciences USA, Vol. 104, No. 14, pages 6066–6071; April 3, 2007.