

СВЯЗАННЫЕ ОДНОЙ НЕЙРОЦЕПЬЮ

воздействий. Разрабатываемая система также содержит модуль компьютерного моделирования биологических нейронных сетей для проведения предварительных вычислительных экспериментов с задачами обучения и тестирования соответствующих алгоритмов. Знания о процессах обучения на уровне групп нейронов используются нами в экспериментальной работе с культивируемыми нейронами, полученными из стволовых клеток, с целью формирования функциональных нейронных сетей при разработке новых методов терапии на основе трансплантации нервной ткани.

Таким образом, несмотря на прогресс в области изучения механизмов функционирования мозга на основе применения современных методов исследования, общая теория функции мозга, способная объяснить поведенческие, когнитивные и психические процессы, далека от завершения, но масштабные усилия международных коллективов ученых дают основания ожидать принципиально новые результаты в этой области уже в обозримом будущем.

Работа выполняется в рамках ГПНИ «Конвергенция» и под-держана фондом «Science Around Us Foundation» (Лондон). □

See: http://innosfera.by/2015/12/cognitive_processes

Андрей Денисов,

заведующий лабораторией клеточной инженерии и нанобиотехнологий кафедры биофизики физического факультета БГУ, кандидат биологических наук

Павел Булай,

доцент кафедры биофизики физического факультета БГУ, кандидат физико-математических наук

Тарас Питлик,

старший преподаватель кафедры биофизики физического факультета БГУ

Сергей Черенкевич,

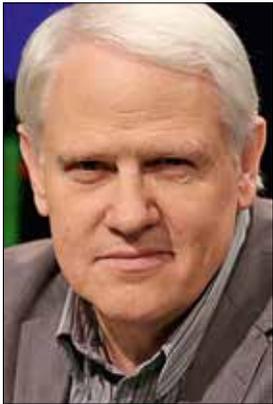
заведующий кафедрой биофизики физического факультета БГУ, академик

Литература

1. From the neuron doctrine to neural networks / R. Yuste // Nat. Rev. Neurosci. 2015. Vol. 16, №8. P. 487–497.
2. Neuroanatomy: Cajal and after Cajal / E.G. Jones // Brain research reviews. 2007. Vol. 55, №2. P. 248–255.
3. Sir Charles Scott Sherrington (1857–1952) and the synapse / J.M. Pearce // J. Neurol. Neurosurg. Psychiatr. 2004. Vol. 75, №4. P. 544.
4. Neural networks in the future of neuroscience research / M. Rubinov // Nat. Rev. Neurosci. 2015. Vol. 16, №12. P. 767.
5. Deep learning / Y. LeCun, Y. Bengio, G. Hinton // Nature. 2015. Vol. 521, №7553. P. 436–444.
6. Brain-mapping projects using the common marmoset / H. Okano, P. Mitra // Neurosci. Res. 2015. Vol. 93. P. 3–7.
7. Neuroscience thinks big (and collaboratively) / E.R. Kandel [et al.] // Nat. Rev. Neurosci. 2013. Vol. 14, №9. P. 659–664.
8. Jorgensen L.A. The BRAIN Initiative: developing technology to catalyse neuroscience discovery // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. 2015. Vol. 19. P. 1668.
9. The brain activity map project and the challenge of functional connectomics / A.P. Alivisatos [et al.] // Neuron. 2012. Vol. 74, №6. P. 970–974.
10. The Human Brain Project and neuromorphic computing / A. Calimera, E. Macii, M. Poncino // Funct. Neurol. 2013. Vol. 28, №3. P. 191–196.
11. The blue brain project / H. Markram // Nat. Rev. Neurosci. 2006. Vol. 7, №2. P. 153–160.
12. Brain Networks and Cognitive Architectures / S.E. Petersen, O. Sporns // Neuron. 2015. Vol. 88, №1. P. 207–219.
13. Reconstruction and Simulation of Neocortical Microcircuitry / H. Markram [et al.] // Cell. 2015. Vol. 163, №2. P. 456–492.
14. 10¹⁴ / T.M. Wong [et al.] // IBM Research Report // Computer Science. 2012, RJ10502 (ALM1211–004).
15. Brain-mapping projects to join forces / S. Reardon // Nature News. 2014, doi:10.1038/nature.2014.14871.
16. Neuroscience: Where is the brain in the Human Brain Project? / Y. Frégnac // Nature. 2014. V. 513. P. 27–29.
17. The neocortical microcircuit collaboration portal: a resource for rat somatosensory cortex / S. Ramaswamy [et al.] // Front Neural Circuits. 2015. Vol. 9. P. 44.
18. Systems biology in the context of big data and networks / M. Altaf-Ul-Amin [et al.] // Biomed Res Int. 2014. Vol. 2014. P. 428570.
19. Структурно-функциональный отклик биологических нейронных сетей на внешние модулирующие воздействия / А.А. Денисов, П.М. Булай, Т.А. Кулагова, П.Г. Молчанов, Т.Н. Питлик, С.Н. Черенкевич // Вестник БГУ. 2011. Сер. 1. №3. С. 32–38.
20. Обучающиеся нейронные сети: перспективы для диагностики и лечения / А.А. Денисов, С.Я. Килин, С.Н. Черенкевич, П.Г. Молчанов, В.А. Кульчицкий // Наука и Инновации. 2013, №2. С. 8–12.
21. Neural ensemble communities: open-source approaches to hardware for large-scale electrophysiology / J.H. Siegle [et al.] // Curr. Opin. Neurobiol. 2015. Vol. 32. P. 53–59.

История прогресса – во многом история развития инструментов, которые человек применял для освоения окружающего мира. До сих пор все они были приспособлены исключительно под каналы взаимодействия с окружающим миром, дарованные человеку природой. Однако сегодня мы стоим на пороге революции, которая может позволить человечеству перешагнуть этот барьер и выйти на качественно иной уровень работы с внешними инструментами. Об этом наша беседа с заведующим лабораторией нейрофизиологии и нейрокомпьютерных интерфейсов биологического факультета Московского государственного университета доктором биологических наук, профессором Александром КАПЛАНом.





— Александр Яковлевич, что сегодня представляют собой нейрокомпьютерные интерфейсы? Какие механизмы и алгоритмы в них закладываются?

— Для начала стоит расшифровать это понятие. В 2002 г. в США прошла специализированная конференция, на которой Джонатан Волпау дал определение, впоследствии ставшее общеупотребительным: нейрокомпьютерные интерфейсы — это устройства, которые позволяют человеку управлять внешними физическими объектами без помощи мышц, лишь на основании регистрации электрической активности мозга (ЭЭГ). В наших работах мы используем похожую, но немного отличающуюся формулировку: нейрокомпьютерные интерфейсы — это технология, которая позволяет человеку научиться управлять внешними физическими объектами, информационными потоками без помощи мышц, только на основании регистрации электрической

активности мозга. И добавляем к этому: таким образом, индивидуум может управлять внешними объектами с помощью волевых усилий. Эти усилия или намерения мы расшифровываем на основании полученных от ЭЭГ-датчиков данных, а дальше уже дело техники — передать выделенные команды персональному компьютеру либо исполнительным механизмам, например транспортного средства. Что касается применяемых исследователями подходов при съеме информации с мозга, то здесь нет большого разнообразия. Начинается все, как правило, с регистрации и первичного анализа электроэнцефалограмм, получаемых с помощью электродов на коже головы. При этом крайне важна предварительная обработка данных. Дело в том, что обычно ЭЭГ сильно зашумлена артефактами, связанными с механическими движениями человека и внешними электромагнитными полями. Дальше алгоритмы обычно основаны на технологии тестирования. К примеру, чтобы научиться считывать намерение сжать левую или правую руку, участнику эксперимента в случайном порядке демонстрируют на экране стрелки в соответствующих направлениях и просят сосредоточиться на мыслях о нужной конечности. При этом непрерывно пишется ЭЭГ. Далее сегменты записи ЭЭГ собираются в две обучающие выборки, соответствующие двум тестируемым намерениям человека. На них тренируются алгоритмы классификации намерений по данным ЭЭГ. После этой

стадии сбора и обработки первичных данных можно уже вести онлайн-мониторинг намерений человека по данным срабатывания классификатора в непрерывно регистрируемой ЭЭГ. Как только обнаруживается сегмент ЭЭГ, представляющий ту или другую тестовую выборку, на этом основании формируется соответствующая команда.

Детектирование намерения сжать правую руку можно сопоставить, скажем, с включением телевизора. Тогда это мысленное усилие человека будет каждый раз включать данный прибор, а представление движения левой рукой, например, — выключать свет в комнате.

Можно спросить, почему бы не детектировать само намерение включить телевизор и не связывать это действие с намерением сжать правую руку? Оказывается, признаки, не связанные с телесными ощущениями намерений, к примеру «я хочу апельсин» или «я хочу в отпуск», практически невозможно обнаружить в ЭЭГ.

— Может быть, дело в одинаковой эмоциональной окрашенности упомянутых желаний?

— Думаю, причина в том, что абстрактные психические образы очень многомерны, там и эмоциональность, и цвет, и связь с прошлым опытом, и потребительские свойства — и все это настолько перемешано и динамично, что на уровне ЭЭГ уже теряет специфическую связь с первопричиной. Остаются только эмоциональные реакции. В ЭЭГ хорошо чувствуется наличие эмоционального всплеска, а вот конкретика его уже не определяется. Конечно, ученым хотелось бы найти как можно больше намерений, которые уверенно считываются с мозга. Тогда можно было бы реализовать значительное число команд. К сожалению, 15 лет работы во всем мире, а этим занимаются сотни лабораторий, не привели к существенному успеху. Простыми средствами мы можем

различить лишь три, максимум четыре состояния. И то вероятность их распознавания – лишь 60–80%. Лучше всего выявляются представления о левой и правой руках.

– Если анализировать не внутренние желания человека, а его реакцию на внешние события, здесь ситуация проще?

– Внимание к внешним образам распознается гораздо лучше. К примеру, в нашей лаборатории по электроэнцефалограмме идентифицируется 36 символов, пока испытуемый по очереди смотрит на них на экране. Это нам позволило создать «Нейрокоммуникатор» для набора текстов без мышечных усилий.

– Насколько индивидуальны либо универсальны реакции людей, считанные с помощью ЭЭГ?

– Если мы пытаемся выявить отклик на внешние явления, то он глубоко индивидуален. Мы фиксируем происходящее в мозге с помощью многоканальной регистрации, то есть считываем данные сразу с многих точек. Чем их больше, тем больше информации, и с тем большей надежностью можно вести распознавание образов. В то же время из практических соображений число электродов, как правило, ограничивают восемью. Этот «джентльменский набор» позволяет обеспечить определенные реакции человека на внешние символы с 95-процентной вероятностью. Внутренние намерения диагностируются с гораздо худшими результатами, но при этом индивидуальные особенности здесь проявляются меньше – есть общие закономерности для всех людей и даже для млекопитающих. Когда думаешь про левую руку – активируется правое полушарие, и наоборот.

– Изменяется ли реакция мозга с течением времени?

– Классификатор ЭЭГ, созданный для конкретного чело-

века сегодня, можно применять и через полгода-год. Если установить электроды в те же места, мы получаем практически полную воспроизводимость экспериментальных данных. Реакции на уровне электроэнцефалограммы очень стабильны и должны сохраняться много лет.

– Каковы потенциальные возможности нейрокомпьютерных интерфейсов? Каких результатов удастся достигнуть в будущем?

– Думаю, тут в первую очередь необходимо определиться с параметрами оценки. Первый из них – количество команд, которые человек сможет отдавать силой мысли. Увы, на данный момент эти возможности практически выбраны. Несколько образов/команд – все, на что мы пока можем претендовать. И неизвестно – это принципиальное ограничение, связанное с природой самой электроэнцефалограммы, или все-таки можно рассчитывать на большее. Конечно, есть еще инвазивные интерфейсы, которые требуют вживления электродов в мозг. Они сулят куда большие перспективы, и их исследование активно ведутся последние несколько лет, но вряд ли они получат широкое распространение для здоровых людей.

– А для тяжелых больных, в частности парализованных?

– Здесь достигнуты серьезные результаты. Например, пациент с помощью таких систем может управлять кибернетическим манипулятором – искусственной рукой.

– Возвратимся к теме неинвазивного съема информации. Может быть, совершенствование МРТ или аналогичных методов позволит сделать качественный скачок и вывести нейрокомпьютерные интерфейсы на новый уровень?

– Будем реалистами. Томографы пока что весьма громоздкие устройства, и по пути их миниатюризации придется идти очень долго. В научных целях исследования возможностей распознавания возникающих в мозге образов с помощью МРТ ведутся, но в практическую область они выхода пока не имеют. Самым эффективным и дешевым методом в обозримом будущем останется электроэнцефалограмма. Электроды и соответствующая электронная часть, необходимые для ее снятия, вместе стоят порядка 200 долларов, то есть это уже сейчас довольно недорогие устройства. В частности, они вышли на массовый рынок в сегменте игр и развлечений и в том числе поэтому стремительно совершенствуются и удешевляются.

– Как быстро подобные системы и пользователи настраиваются друг на друга?

– Для классификации по ЭЭГ признаков тех или иных реакций на внешние объекты и для настройки алгоритмов распознавания требуется буквально 5–6 минут. А вот для того чтобы отдавать команды силой мысли, некоторым нужно тренироваться несколько месяцев. Не каждый человек быстро учится концентрироваться, четко фокусировать свое внимание на внутренних образах, а их «расплывчатость» приводит алгоритм к ошибкам. Тем не менее, у половины людей в конце концов вполне получается отдавать две команды, связанные с правой и левой руками.

– Расскажите, пожалуйста, о ваших разработках для медицины.

– Для Министерства здравоохранения Российской Федерации мы сейчас делаем два устройства – нейрокоммуникатор и нейротренажер. Первое позволяет определять, какой символ на экране выбрал человек. Это дает возмож-

ность общаться с парализованными, перенесшими инсульт людьми. Детектирование внимания пациента к чашке означает, что он хочет пить, к красной кнопке – что нужно вызвать медсестру, и так далее. Второй аппарат делается для реабилитации. Если больной человек не может двигать рукой, то отсутствие движения со временем приводит к отрицательному решению мозга, когда он выносит вердикт, что с конечностью сделать уже ничего нельзя. В этой ситуации ему нужно немного помочь. На кисть пациента надевается специальный механизм, куда передается команда «я хочу сжать руку». Экзоскелетное устройство, соответственно, сжимает и разжимает пальцы. В результате намерение претворяется в действие, нервы конечности активируются, а информация о происходящем поступает в мозг, и эта цепочка начинает укрепляться и поддерживаться.

– Нужно ли для создания полноценных интерфейсов полностью разобраться в работе мозга? Или с ним вполне можно работать как с черным ящиком?

– Мозг – очень сложный орган. Быть может, эта структура – самая сложная не только на Земле, но и во всей Вселенной. Только представьте себе: миллионы миллиардов элементов системно взаимодействуют, и число возникающих комбинаций, состояний непостижимо огромно. Мы не знаем, как работает эта «машина», возможно, процесс идет даже невычислительным способом. Соответственно, остается только фиксировать внешние проявления и продвигаться в исследованиях путем установления корреляций. Подход к мозгу как к черному ящику – единственно возможный в обозримом будущем. При этом, вероятно, есть теоретический предел и в том, что именно можно считать с мозга. Сможем ли мы когда-нибудь передать с помощью

некоего интерфейса не определенную команду, а непосредственно мысль? Думаю, что это сделать нельзя. Точно так же, как невозможен вечный двигатель.

– А каковы, на ваш взгляд, перспективы интеграции мозга с внешними устройствами?

– По всей видимости, будущее нейрокомпьютерных технологий – в гибридных интерфейсах, когда мы регистрируем не только активность головного мозга, но и нервные импульсы в других органах, в частности мышцах, а также отслеживаем движение глаз. В сумме это дает куда больший массив информации, который можно использовать для интеграции с различными устройствами.

– Интерфейсы могут быть одно- и двунаправленными. Можно ли не только считывать с мозга, но и обеспечить обратный поток данных?

– Большинство разработок предусматривает лишь передачу команд из головы во внешнюю среду. Предполагается, что обратный поток более-менее организуется сам по себе. К примеру, если человек управляет экзоскелетом, он непосредственно видит и чувствует, что происходит. В то же время иногда актуальна задача организации двусторонней связи с тем или иным контролируемым объектом. Организация эффективной передачи ответной информации в мозг сильно помогла бы построению полноценных нейрокомпьютерных интерфейсов. Однако здесь возникает проблема: куда и как передавать данные? Не вживлять же электроды, чтобы подавать электрические импульсы напрямую. Да к тому же мы и не знаем, как именно организовать сигналы, чтобы они были содержательными и могли быть расшифрованы. Пока исследователи реально используют только сенсорные кана-

лы. Например, если осуществляется дистанционное управление манипулятором, то положение его частей преобразуется в вибрации разной частоты актуаторами, установленными на коже плеча. Таким образом пространственная информация перекодируется в другую и уже в этом виде считывается мозгом.

– Киборги – это реальная перспектива или все-таки фантастика?

– Определим киборгов как объединение живой ткани мозга человека и технических средств для дополнения интеллектуальной и физической сферы людей. Если говорить об интеллектуальной части, то возможности такого нейротехнического объединения очень ограничены, хотя бы потому, что коды мозга слишком сложны и мультивариантны для их расшифровки в реальном времени жизни человека на Земле. А к этому существует еще проблема подключения: все-таки наш мозг – это миллион миллиардов контактов между нервными клетками. В каждом таком контакте воплощается уникальный код. Кроме того, вживление электродов в мозг здорового человека является антигуманистическим действием, подпадающим под мораторий во всех развитых странах мира. Я считаю, что если речь идет о здоровых людях, то здесь нужно исповедовать следующий принцип: человек должен иметь возможность в любой момент и без негативных последствий отключиться от устройств, использующих нейрокомпьютерные интерфейсы. Еще одно ограничение, которое нам следует предусмотреть, – на избыточное применение искусственного интеллекта. Человек не должен стать чрезмерно зависим от электронных помощников. ■

Владимир ЛЕБЕДЕВ