



На пути к искусственному интеллекту



НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

Согласно закону Мура, производительность компьютеров удваивается примерно каждые 18 месяцев. Многие специалисты полагают, что рано или поздно это развитие упрется в некий предел быстрогодействия, который будет определяться атомарной природой вещества и растущим тепловыделением рабочих элементов.

Насколько эти опасения оправданы, разберутся специалисты. К счастью, технологии не стоят на месте. Как известно, научные прорывы обычно случаются на стыке наук, и гибридные системы с искусственным интеллектом если не завтра, то послезавтра готовы прийти на смену привычному «железу», не дожидаясь его естественной смерти. О новейших разработках в этой области и участии в них российской науки мы побеседовали с заместителем директора по научной работе Вячеславом Александровичем Деминым и заведующим лабораторией нейроинтеллекта и нейроморфных систем Курчатковского НБИКС-центра Михаилом Сергеевичем Бурцевым

Вдохновение и разочарование

— Разработка теории искусственного интеллекта продолжается уже не первое десятилетие. Какие на данный момент достигнуты успехи в этой области?

В.А. Демин: Одним из первых, кто задумался о создании помощника для человека в выводе заключений, был российский ученый Семен Николаевич Корсаков. В 1832 г. он построил ряд механических устройств «для усиления человеческого разума», которые помогали в задачах поиска, сравнения и классификации множества информационных записей при работе с большими объемами данных, став фактически предтечами современных экспертных систем. Например, машины Корсакова позволяли по набору признаков заболевания ставить диагноз. Конечно, это были достаточно примитивные устройства. Корсаков первый ввел в употребление и перфокарты. Но тогда, в первой половине XIX в., на это изобретение смотрели больше как на игрушку.

— Он опередил свое время.

В.А. Демин: Причем намного. Seriously об искусственном интеллекте ученые стали задумываться только ближе к середине XX в. В первую очередь здесь потрудились такие замечательные математики, как Алан Тьюринг и Джон фон Нейман, которые формализовали понятия вычислений и вычислительной машины, разработали теорию алгоритмов. Тогда же возникла теория клеточных автоматов. Более того, Джон фон Нейман стал первым задумываться о промышленном создании вычислительных устройств. И, как мы знаем, первый реализовал архитектуру, на которой построены почти все современные компьютеры: процессор и память физически разделены, процессор постоянно обращается к памяти, причем за один такт может быть только одно обращение, поэтому данный процесс последователен и тем самым ограничен в быстродействии.

В это же время, в середине XX в., стали развиваться искусственные нейронные сети. Часть ученых пошли

по сформулированному Джоном фон Нейманом пути архитектуры компьютеров, которой мы пользуемся сейчас. Но некоторые ученые задались целью попробовать смоделировать работу мозга, где информация параллельно обрабатывается и хранится в одних и тех же структурах — нейронах.

Первые нейронные сети возникли благодаря усилиям математиков-информатиков Уоррена Маккаллока и Уолтера Питтса. Они ввели понятие формального нейрона. Чуть позже Фрэнк Розенблатт сформулировал более развитое понятие перцептрона, состоящего из ряда входов для задания на них комбинации поступающих сигналов, одного или нескольких внутренних слоев нейронов и слоя выходных нейронов, на которых вырабатывался итоговый отклик на входной сигнал в результате специального нелинейного взаимодействия связанных между собой нейронов. Такие сети продемонстрировали способность к обучению, которая выражалась в возможности, после некоторого тренировочного алгоритма, привязки близких комбинаций сигналов на входах к определенному выходу (или комбинации выходов) перцептрона и, наоборот, существенно различных комбинаций на входах — к разным выходам (их комбинациям). Таким образом, математическое развитие данной области послужило стимулом уже к ее программной реализации. Затем стали задумываться и об аппаратном уровне, но тогда, в середине XX в., не было подходящих технологий.

Таким образом, указанные две ветви (последовательных и параллельных вычислений) стали бурно развиваться. Стало понятно, что моделировать нейронные сети можно на классических компьютерах с неймановской архитектурой. Начали предпринимать первые попытки. Был построен компьютер «Марк I» на основе нейронной сети, но он работал крайне медленно из-за последовательного алгоритма обработки данных: процессор обращается к памяти, получает оттуда данные, потом обращается за инструкциями, получает их и обрабатывает эти данные. После этого процесс повторяется снова.

М.С. Бурцев: Тогда же появился и сам термин «искусственный интеллект», потому что изначально это все называлось кибернетикой, математикой, нейрофизиологией — не было четкого названия. На том этапе был огромный энтузиазм: все выглядело так, будто вот-вот мы достигнем фантастических результатов, что к концу 1960-х — началу 1970-х гг. у нас будет робот, который думает как среднестатистический человек.

В 1969 г. Марвин Минский вместе с Сеймуром Папертом опубликовали книгу «Перцептроны», в которой показали, что эти нейронные сети плохо работают в некоторых задачах классификации. Возник некий кризис. Интерес к данной области стал резко падать, и примерно на 15 лет нейронные сети были едва ли не забыты, а внимание, в том числе и средства, были в основном переключены на развитие неймановских компьютерных технологий, символичный искусственный интеллект и моделирование рассуждений. Прошли годы, но эти методы с детерминированными алгоритмами не оправдали возлагаемых на них надежд.

Новые надежды

В.А. Демин: Выход из кризиса искусственных нейронных сетей подсказал российский ученый Александр Иванович Галушкин: он одним из первых опубликовал метод обратного распространения ошибки в нейронных сетях. Это эффективный метод обучения — изменение или перекалибровка силы связей между нейронами по направлению от выходного слоя нейронов к входному за счет сравнения получаемого отклика всей сети (перцептрона) с ожидаемым.

Это и еще одно открытие для сетей с обратными связями способствовали тому, что искусственные нейронные сети с 1980-х гг. и до нынешнего дня вновь перешли в стадию бурного развития, а в 2000-е гг. сюда подключились и технологии. Это и нано-, и биотехнологии, которые позволили изучать структуру мозга, его функциональную активность во всех микроскопических деталях, а также нейрокогнитивные технологии, позволяющие исследовать то же самое на макроскопическом уровне. В России подобные методы стали появляться в исследовательских лабораториях во второй половине 2000-х гг. В 2009 г. директор НИЦ «Курчатовский институт» М.В. Ковальчук создал специальное подразделение института — Курчатовский НБИКС-центр, в котором были собраны всеядно мощнейшие научные и технологические установки для исследований, начиная практически от всех видов микроскопов и заканчивая литографическими машинами, синхротронными и нейтронными станциями. Данное подразделение воплотило в себе зримый пример масштабной реализации идеи конвергенции нано-, био-, информационных, когнитивных и социогуманитарных наук и технологий. Эта лаборатория — одна из немногих в мире, в которой присутствуют почти все составляющие — от инструментальных до интеллектуальных — для развития многих междисциплинарных направлений, включая нейрокогнитивные науки.

Изучение мозга, с одной стороны, необходимо для лечения нейродегенеративных заболеваний — таких как болезни Альцгеймера, Паркинсона, боковой амиотрофической склероз и т.п. С другой стороны, мы получаем возможность смоделировать работу мозга на уровне отдельных нейронов и их сетей и переложить эти знания уже на искусственные системы. Это, собственно, и предопределило развитие работ над искусственным интеллектом в наше время.

М.С. Бурцев: Работы в нашем центре, привлекающие нейронауки для исследования принципов создания искусственного интеллекта, очень актуальны и с точки зрения международной науки, где все проекты, связанные с мозгом, выходят на первый план. Например, в рамках европейской грантовой программы «Горизонт-2020» выделяются два флагманских проекта: первый из них связан с исследованием и моделированием на суперкомпьютере мозга человека — *Human Brain Project*, а второй с исследованием графена. Есть и аналогичный американский проект, но он больше ориентирован на исследование структуры мозга и функциональных связей между нейронами.



многое знаем о том, как изменяются связи между нейронами, но как учится целый организм, для нас до сих пор остается тайной.

Инфраструктура для искусственного мозга

— **Какая работа в этом направлении ведется непосредственно в Курчатовском институте?**

В.А. Демин: В Курчатовском институте в последние годы под руководством М.В. Ковальчука в НБИКС-центре создана вся инфраструктура для исследований мозга как в макроскопическом, так и в микроскопическом масштабе. На макроскопическом уровне — это МРТ, фМРТ, ПЭТ-томография, электроэнцефалография и появляющиеся в настоящее время ее подвиды. Ведется изучение мозга и на уровне отдельных нейронов и их популяций — с помощью флуоресцентной и других типов оптической микроскопии. Данные методы включают в себя как исследования *in vitro*, когда животное обучается, в активных нейронах экспрессируются различные белки, после чего мозг извлекается и исследуется под микроскопом, так и методы изучения работы живого мозга *in vivo*. Последние включают в себя неинвазивные (в смысле проникновения в мозг) методы, когда мы только «вырезаем» окошко в черепе лабораторного животного и наблюдаем через лазерный микроскоп за активностью отдельных нейронов. Мы развиваем также современные инвазивные методы оптогенетики, когда в мозг вводится оптоволокно, заточенное настолько остро, что на конце может иметь размер вплоть до отдельного нейрона и меньше, и регистрируется или даже стимулируется светом активность одного или нескольких отдельных нейронов. Для стимулирования активности нейрона животное должно быть генно-модифицированным, чтобы в клетках мозга вырабатывались белки, способные реагировать на поступающий через волокно свет. Кроме того, генно-рекомбинантные животные могут содержать флуоресцентные белки, которые легко регистрировать по их свечению в ответ на лазерное излучение. В лаборатории нейрофизиологии и когнитивных наук НБИКС-центра используют оба типа генно-модифицированных мышей.

— **Вы работаете еще и с культурами живых нейронов, изучаете механизмы их действия...**

М.С. Бурцев: В нашей лаборатории мы сочетаем экспериментальные и теоретические подходы для того, чтобы понять основные принципы работы нервной системы на клеточном уровне и использовать их для разработки искусственных когнитивных систем. Что бы мы хотели в идеале от экспериментов? Так как мы сегодня уже понимаем, что наше поведение управляется распределенными сетями миллионов нейронов, мы бы хотели видеть все эти нейроны, то, как они детерминируют конкретное поведение. Но увидеть это очень сложно



— **Какие у каждого из проектов преимущества и недостатки?**

М.С. Бурцев: Минус американского подхода в том, что не задана четко конечная цель, в двух словах ее можно сформулировать так: «Мы хотим детально узнать, как устроен мозг, получим данные, потом разберемся». В европейском проекте другой подход: «С одной стороны, мы тоже хотим все узнать. Но, с другой стороны, мы работаем над созданием компьютерной модели мозга — это будет не просто модель, а база данных, в которой будут храниться все наши знания о том, как мозг работает». То есть по этой логике в конце концов такая модель начнет чуть ли не мыслить, и, используя ее, можно будет перенести какие-то когнитивные принципы на роботов. Также, например, можно будет тестировать лекарства на модели, а не на реальных людях. Проблема здесь в том, что после того, как мы «соберем» весь мозг из нейронов, учитывая наши сегодняшние знания, он с большой долей вероятности не заработает. При этом, скорее всего, будет непонятно, в каком месте у нас проблема. При всех плюсах обоих вариантов очевидно, что они очень трудозатратные, и в принципе непонятно, сколько времени надо на их реализацию. Самое же главное, что оба подхода подразумевают некий качественный скачок в нашем понимании работы мозга. Но что за скачок и на каком этапе исследований — неясно. Мы

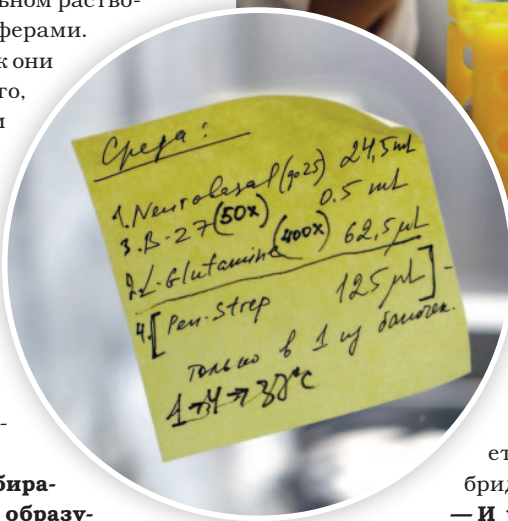
потому, что мозг имеет трехмерную структуру. Локализовать каждый нейрон? Мы, в принципе, это можем сделать, но не в живом мозге. Мы можем увидеть каждую клетку и связи между ними. Но мы ведь исследуем не просто мозг сам по себе, а то, как в нем зарождается поведение. Если представить идеальный экспериментальный метод, то мы бы хотели видеть, как животное обучается, как проявляет свои интеллектуальные способности, и одновременно — какие изменения происходят в сетях нейронов его мозга.

Как увидеть нейронную сеть целиком? Для этого можно извлечь из мозга живые клетки, высадить их в пробирку. Если это сделать, сеть нейронов начинает расти, устанавливаются связи, образовывается нейронная сеть, которая проявляет спонтанную активность. Нейроны в пробирке живут не по отдельности, а начинают друг с другом взаимодействовать, потому что «не знают», что их вынули из мозга. Они продолжают делать то, что в них заложено генетической программой. Обычно клетки объединяются в группы и плавают в питательном растворе в виде шаров, называемых нейросферами.

Их не очень удобно исследовать, так как они все время передвигаются, кроме того, они трехмерные. Но если мы покроем дно чашки специальным составом, то клетки к нему «прилипнут»: они могут передвигаться по поверхности, но не могут оторваться и образовать нейросферы. Тогда, поместив чашку с клетками под микроскоп, мы сможем увидеть всю сеть, в которой обычно десятки или сотни тысяч клеток. Мы можем встроить в них микроэлектроды и зарегистрировать электрическую активность.

— Но ведь если обычно клетки собираются в нейросферу, то на дне чашки образуется «нейроплоскость». И там будет всего лишь взаимодействие в рамках какой-то смоделированной системы. Насколько то, что мы увидим, будет отражать действительность?

М.С. Бурцев: Мы не знаем точно, будут ли они воспроизводить то, что делают в мозге. Насколько это относится к реальной деятельности мозга? И как это связано именно с обучением, которое мы хотим понять? В идеальной модели мы должны видеть и весь мозг, и поведение. В культуре нервных клеток в пробирке мы видим весь «мозг», но поведения нет никакого. Можем ли мы этой культуре придать какое-то поведение? Мы как раз и занимаемся тем, что пытаемся добавить в эту экспериментальную биологическую модель поведение, стараясь соединить культуру нейронов с внешней средой — реальной или виртуальной — при помощи некоторого «тела». В нашем случае — работа. У него есть сенсоры, которые позволяют чувствовать окружающий мир. Сигналы от сенсоров при помощи электродов транслируются в культуру, позволяя ей «увидеть» то, что видит робот. И в обратную сторону: активность культуры



нейронов преобразуется в команды для робота. Так у нас получается робот, который управляется живыми нейронами. Такой гибрид называется нейроанимат или нейрогибридная система.

— И у вас уже есть действующая модель такого нейроанимата?

М.С. Бурцев: У нас есть культура с нейронами, с которой мы можем взаимодействовать, регистрируя активность клеток и стимулируя их. И есть робот. Но чтобы у нас была готовая система, нужно соединить одно с другим. Над этой частью, которая их соединяет, мы сейчас и работаем.

В.А. Демин: Есть интересный промежуточный результат. Когда на дно лабораторной чашки со специальной средой высаживают стволовые нейрональные клетки, они начинают расти и объединяться связями посредством синапсов. Когда уже через месяц эта сеть вырастает, она начинает проявлять собственную активность как целое. Возникает синхронная работа отдельных нейронов, синхронное возбуждение — так называемая пачечная активность. Через определенные промежутки времени — такты — одновременно появляются электрические сигналы на каждой из связанных друг с другом клеток, т.е. живая нейронная сеть начинает развиваться как единое целое, что говорит о ее самоорганизации. Пока не ясно в деталях, как это происходит.

От электронов к нейронам

— Каковы основные преимущества нейронных сетей перед традиционной компьютерной архитектурой?

В.А. Демин: Первое: обработка, запись и хранение информации производятся в одном месте, в одних и тех же структурах — в нейронах. Это позволяет нам производить масштабные параллельные вычисления. В классической архитектуре процессор должен постоянно обращаться к памяти, а здесь мы можем одновременно и извлекать данные, и производить вычисления с ними — поскольку это происходит в одном и том же месте, параллельно. Второе: нейросети весьма устойчивы к помехам на входах и даже к разрушениям их отдельных частей за счет изменения силы связей и перекоммутации сигналов через другие нейроны. Это же свойство позволяет создавать устойчивые и надежные нейросистемы из ненадежных элементов, имеющих значительный разброс параметров. Третье: способность к обучению. Когда вы предъявляете некую обучающую выборку объектов, закодированных комбинациями входных сигналов, нейронной системе, она обучается. Формируются определенные силы или веса связей между нейронами, и за счет изменений этих весов формируется память. Затем предъявляется уже тест, который не присутствовал в обучающей выборке, — система должна отреагировать на этот входной сигнал в соответствии с проведенным обучением. Такой метод называется обучением с учителем, потому что внешний агент — учитель — должен предъявить системе обучающую выборку.

— Как именно реагирует система после обучения?

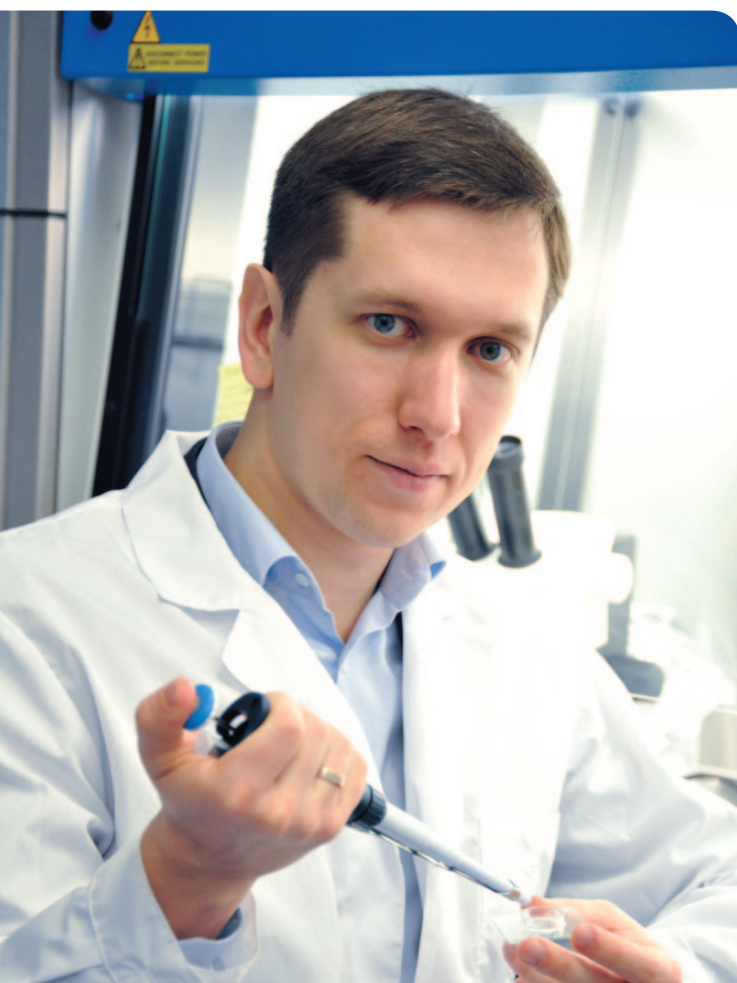
В.А. Демин: Приведу пример. Классические задачи, которые уже сейчас решаются во многих компьютерных системах на основе программируемых искусственных нейронных сетей, — задачи распознавания образов, например букв. У каждого человека свой почерк: наклон букв, непрерывность или дискретность написания элементов и т.п. Задача состоит в том, чтобы распознать одни и те же буквы, написанные разными стилями. Когда мы предъявляем нейросети, допустим, тысячу вариантов написания буквы «А», то уже с большой вероятностью тысячу первый вариант эта сеть распознает как букву «А». Такие программно реализуемые искусственные нейронные сети прекрасно подходят для конкретных специфических задач, например по адаптивному управлению, прогнозированию, аппроксимации данных, распознаванию и классификации образов, причем самых различных — зрительных, звуковых, тактильных и т.д. Нужно лишь перевести эти образы в комбинации сигналов, подаваемые на вход нейронной сети.

— Означает ли это, что удалось найти аналог синапсу, благодаря которому, собственно, и происходит обучение?

В.А. Демин: То, о чем я говорил выше — реализация того или иного типа математической нейронной сети в виде программы на обычном неймановском компьютере. Именно поэтому такие программы работают довольно медленно, ведь в данном случае мы не используем



основное преимущество нейросети — параллелизм. Поэтому в последние годы с развитием технологий наметился другой подход к созданию нейроморфной сети — аппаратная реализация. Для этого нужно смоделировать в материальных элементах сети как минимум два существенных свойства живых нейронных клеток: пластичность синапсов, то есть способность изменять силу связи между клетками за счет величины или частоты протекания сигнала, и «пороговость» нейрона, т.е. его возбуждение только при превышении суммой входящих сигналов некоторой пороговой величины. Данные свойства могут быть смоделированы, хотя бы частично,



Справка

Вячеслав Александрович Демин — заместитель директора по научной работе Курчатовского НБИКС-центра.

- ✓ Родился в Сарове. В 2007 г. окончил физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова. В 2008 г. получил степень кандидата физико-математических наук.
- ✓ Сфера научных интересов: искусственный интеллект, адаптивные нейроморфные сети на мемристорах, транспорт наночастиц в живых организмах, физика низкоразмерных структур.
- ✓ Автор более 15 научных публикаций.

на основе, например, мемристоров, которые были экспериментально открыты только в 2008 г. Мемристоры — это резисторы с памятью, *memory resistor*. Здесь принцип очень простой. Это двухполюсник, который под действием напряжения, обычно выше некоего порога, может менять свое сопротивление, причем изменение тем больше, чем больший электрический заряд через него прошел. Ключевая характеристика такого элемента — наличие петли гистерезиса на вольт-амперных характеристиках. Это свидетельствует о том, что мемристор может «помнить» свои состояния: он остается в проводящем или непроводящем состоянии даже после снятия напряжения.

Я покажу, как происходит переключение мемристора из одного состояния в другое на примере мемристивного устройства из диоксида титана. Такое устройство представляет собой двуслойную гетероструктуру — непроводящий слой TiO_2 и следующий за ним слой TiO_{2-x} с хорошей проводимостью, т.е. TiO_2 , легированный вакансиями кислорода, которые обладают положительным зарядом. В результате их дрейфа под действием напряжения слой TiO_2 насыщается вакансиями и становится проводящим, т.е. вся структура переходит в проводящее состояние. Если убрать напряжение, то структура, естественно, остается в том же физическом состоянии, в котором была непосредственно до этого. Зависимость сопротивления от протекшего через него заряда — основное свойство мемристора. Это и есть реализация сигнала «в железе».

— В Курчатовском институте такая работа тоже ведется?

В.А. Демин: Да. У нас ведутся работы с неорганическими материалами для мемристоров именно на диоксиде титана. Это соединение признается многими исследовательскими группами как один из наиболее перспективных неорганических материалов для мемристоров. *Hewlett-Packard* сейчас пытается реализовать на них память, совмещенную с процессором. В свою очередь, мы планируем делать именно нейроморфные системы на этой основе, т.е. нейронные компьютеры. И для этого у нас тоже все есть: и литографическая зона, и другое необходимое технологическое и измерительное оборудование, кадровый и методический потенциал.

Кроме того, в кооперации с ведущим ученым по данному направлению В.В. Ерохиным из Института материалов для электроники и магнетизма (Парма, Италия), мы разрабатываем и органические мемристоры на основе полианилина — известного проводящего полимера. В отличие от неорганики на основе органических материалов можно создавать так называемые стохастические нейроморфные трехмерные сети, в которых отдельные микромемристоры, образуемые, например, пересечениями волокон полианилина, соединены друг с другом в случайном порядке, т.е. примерно так, как наблюдается в нашем мозге на микромасштабе.

В органическом мемристоре данного типа переключение происходит за счет электрохимической реакции в полианилине.

— Все это очень интересно. Но обывателя в гораздо большей степени интересуют бытовые вопросы, чем высокие материи. Что новая технология может предложить обычному человеку?

В.А. Демин: Аппаратная реализация искусственных нейронных сетей значительно ускорит их производительность за счет использования истинного параллелизма обработки, чтения и записи информации. Такая технология фактически создаст новые продуктовые ниши интеллектуальных устройств практически во всех сферах человеческой деятельности. Именно поэтому усилия целых стран и частных промышленных гигантов, таких как *Google*, *IBM*, *HP* и др., направлены на создание аппаратных нейроподобных систем. Кардинальные изменения могут произойти в медицине, фармацевтике, в тяжелой и легкой промышленности, в авиации и космическом приборостроении, в электронной отрасли и т.д. Конечно, основное применение таких систем предполагается в робототехнике — от бытовых устройств до техногенных, например при устранении последствий различных аварий — когда нужен робот, способный самостоятельно разобраться на месте и принять решение в зависимости от внешних обстоятельств. Огромный интерес представляют также нейроморфные сети для электронных бытовых приложений, например «умные» помощники для нас. Представьте, что будет создано устройство, с которым вы сможете разговаривать почти как с другом или личным референтом, который знает ваши привычки, во сколько вы встаете, что любите на завтрак, какие фильмы или стихи предпочитаете, когда вам нужно принять витамины или лекарства и т.п., при этом используя все эти знания, чтобы вовремя посоветовать, напомнить, заказать что-то для вас через Интернет и т.д.

— Немного пугает такая перспектива.

В.А. Демин: Немного. Но я думаю, что мир пойдет по этому пути. Пока нет никаких экспериментальных или теоретических оснований полагать, что интеллектуальные устройства на основе нейроморфных сетей будут обладать сознанием или искренне переживать эмоции. В то же время доработка их до бессознательных устройств, обладающих способностью к рассуждению в указанном выше смысле, представляется мне разрешимой задачей. Конечно, в первую очередь необходимо еще разработать правильную архитектуру, продемонстрировать успешность обучения, стабильность и т.д. Как только эти стадии по формированию прототипа будут пройдены, на мой взгляд, потребуются лет 10–15, чтобы развить это в массовую инженерную технологию.

М.С. Бурцев: Обычно работа с искусственным интеллектом рассматривают как некоего помощника человека, который может что-то делать быстрее или же может заменить человека в делах, кажущихся неинтересными, сложными, опасными, освободить нас от каких-то рутинных вещей. Однако есть другая неочевидная на первый взгляд сторона исследований в области искусственного интеллекта. Она связана с тем, что это не только



! Справка

Михаил Сергеевич Бурцев — заведующий лабораторией нейроинтеллекта и нейроморфных систем Курчатковского НБИКС-центра. Специалист по эволюционной кибернетике.

- ✓ Родился в Ульяновске. В 2000 г. окончил Московский энергетический институт со степенью магистра по специальности техники и технологии. В 2005 г. получил степень кандидата физико-математических наук.
- ✓ Сфера научных интересов: искусственная жизнь, моделирование эволюционных процессов, эволюция кооперации, рост сложности в природе, проблема адаптивности обучения, селекционные теории обучения, эпистемология и методология науки.
- ✓ Автор более 50 научных публикаций.

прикладное, но и фундаментальное направление исследований, итогом которых станет понимание сущности сознания, мозга и природы человека. Мы можем говорить, что мы знаем, как человек мыслит. Но пока мы не смогли воспроизвести феномен мышления в виде формальной системы, программы или устройства, наше знание неполно. Искусственный интеллект — это проверка на практике всех наших теорий о том, что представляет собой человек. Если мы знаем, как работает наш интеллект, это значит, что мы можем его воспроизвести. ■

Подготовил Виктор Фридман