

## ВКЛАД КОГНИТИВНОЙ НАУКИ В РАЗВИТИЕ НОВЫХ МЕДИЦИНСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

DOI: 10.17691/stm2019.11.1.01

УДК 159.9.07:616.8–07

Поступила 21.12.2018 г.



**Б.М. Величковский**, д.пс.н., профессор, член-корреспондент РАН, главный научный сотрудник<sup>1, 2</sup>; старший профессор<sup>3</sup>;

**В.Л. Ушаков**, к.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник<sup>1</sup>; старший научный сотрудник<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123182;

<sup>2</sup>Российский государственный гуманитарный университет, Миусская площадь, 6, Москва, 125993;

<sup>3</sup>Technische Universität Dresden, Zellescher Weg 17, Room A221, Dresden, 01069, Germany;

<sup>4</sup>Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Каширское шоссе, 31, Москва, 115409

Когнитивная наука является одним из наиболее быстро растущих сегментов современных междисциплинарных исследований, посвященных изучению функций сознания и реализующих эти функции механизмов мозга. Одним из важнейших результатов развития когнитивной науки в последнее время стало появление ряда новых дисциплин (когнитивная эргономика и нейроэргономика, нейроэкономика, нейромаркетинг) и целого класса технологических приложений в медицине и смежных областях науки. В нашей стране эти работы ведутся в рамках Межрегиональной ассоциации когнитивных исследований (МАКИ) и на базе Национального исследовательского центра «Курчатовский институт». Авторы данной статьи — сотрудники НИЦ «Курчатовский институт», руководители МАКИ: член-корреспондент РАН Б.М. Величковский — основатель и первый Президент МАКИ (2006–2010 гг.) и В.Л. Ушаков — действующий Президент с 2018 г.

В статье дан обзор текущих нейрокогнитивных исследований, объединяющих фундаментальные вопросы с практическими приложениями. Описаны результаты ведущихся в НИЦ «Курчатовский институт» работ, направленных на создание новых видов человеко-машинных интерфейсов, которые призваны заменить в ближайшее время традиционные графические интерфейсы пользователя, созданные на раннем этапе когнитивной науки. Эти работы в значительной степени связаны с изучением особенностей зрительного внимания и произвольного глазодвигательного поведения человека. Представлены методы и результаты изучения макромасштабных механизмов мозга. Современные методы, такие как ультрабыстрая функциональная магнитно-резонансная томография и динамическое каузальное моделирование, позволяют в полностью неинвазивном режиме восстанавливать картину причинно-следственных взаимодействий структур головного мозга человека при решении тех или иных задач и в базовом для сознания человека состоянии бодрствующего покоя. С помощью этих методов удалось впервые изучить взаимодействия механизмов мозга, относящихся к различным эволюционным уровням его организации, а именно древнейшей, древней, новой и новейшей коре. Примером первой служит гиппокамп, а последней — фронтально-полярные области лобных долей. В результате получены новые данные по асимметрии головного мозга человека в норме и патологии, указывающие на важность межполушарной асимметрии с правополушарным доминированием эффективных (причинно-следственных) связей в состоянии покоя при нормальном функционировании мозга и сознания человека. Авторы подчеркивают, что особенности макромасштабной организации могут и должны быть соотнесены с молекулярными механизмами соответствующих нейросетей головного мозга человека.

Приводятся результаты изучения особенностей экспрессии белок-кодирующих генов во фронтально-полярных отделах лобной коры. Эти исследования также выявили правостороннее доминирование, но на этот раз по количеству экспрессирующихся генов, которые оказались связанными с риском шизофрении. При этом не было обнаружено связи с основными нейродегенеративными заболеваниями.

Диагностика сознания всегда играла важнейшую роль в медицине. По сегодняшний день коммуникативный контакт с пациентом остается основным тестом сохранности сознания. Одновременно растет значение объективных методов. Приводятся аргументы, свидетельствующие о том, что моделирование сознания и соответствующая имплементация представляют собой важнейшее условие дальнейшего развития работ в области когнитивных технологий и машинного «интеллекта».

**Для контактов:** Величковский Борис Митрофанович, e-mail: boris.velichkovsky@tu-dresden.de

**Ключевые слова:** сознание; когнитивные технологии; когнитивные интерфейсы; активное зрение; эффективные связи головного мозга; гиппокамп; лобные доли; межполушарная асимметрия; искусственный интеллект.

**Как цитировать:** Velichkovsky B.M., Ushakov V.L. Cognitive science and novel medical technologies. *Sovremennye tehnologii v medicine* 2019; 11(1): 8–15, <https://doi.org/10.17691/stm2019.11.1.01>

English

## Cognitive Science and Novel Medical Technologies

**B.M. Velichkovsky**, DSc, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher<sup>1</sup>; Chief Researcher<sup>2</sup>; Senior Professor<sup>3</sup>;

**V.L. Ushakov**, PhD, Associate Professor, Leading Researcher<sup>1</sup>; Senior Researcher<sup>4</sup>

<sup>1</sup>National Research Center “Kurchatov Institute”, 1 Akademika Kurchatova Square, Moscow, 123182, Russia;

<sup>2</sup>Russian State University for the Humanities, 6 Miusskaya Square, Moscow, 125993, Russia;

<sup>3</sup>Technische Universität Dresden, Zellescher Weg 17, Room A221, Dresden, 01069, Germany;

<sup>4</sup>National Research Nuclear University MEPhI, 31 Kashirskoe Shosse, Moscow, 115409, Russia

Cognitive science is one of the fastest growing segments of modern interdisciplinary research into the functions of consciousness and into mechanisms implementing these functions in the brain. One of the impressive results of this research has been the emergence of novel scientific disciplines (cognitive ergonomics and neuroergonomics, neuroeconomics, neuromarketing) and a whole class of technological contributions in medicine and related life sciences. In this country, the relevant studies are conducted within the Interregional Association for Cognitive Studies (IACS) on the basis of the National Research Center “Kurchatov Institute”. The authors of this article work in the Kurchatov Institute and represent the leadership of the IACS: Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences B.M. Velichkovsky — the founder and first president of this Association (2006–2010) and V.L. Ushakov — the current president of IACS since 2018.

The article provides an overview of current neurocognitive research, combining fundamental issues with practical applications. The author describes the studies under way at the National Research Center “Kurchatov Institute” aimed at creating new types of human-machine interfaces, which are intended to replace the traditional graphic interfaces created for users at early stages of cognitive science. These studies concentrate on visual attention and voluntary oculomotor behavior. The methods and results of exploring the macroscale brain mechanisms are presented. Modern methods, such as ultrafast functional magnetic resonance imaging and dynamic causal modeling, allow one to non-invasively reconstruct the picture of cause-effect interactions in the human brain both at rest and at solving various tasks. Using these methods, it became possible, for the first time, to investigate the interaction between different brain mechanisms attributed to different evolutionary levels of its organization, namely, the oldest, old, new and newest cortex. An example of the first is the hippocampus, and that of the newest is the front-polar areas of the frontal lobes. As a result, new data on the asymmetry of the human brain in health and disease were obtained, indicating the importance of the interhemispheric asymmetry and the right hemisphere dominance over the effective (cause-effect) connections during normal functioning of the brain and consciousness at rest. The authors emphasize that the macroscale organization can and should be studied in the context of molecular mechanisms of the respective neural networks in the human brain.

The expression of protein-encoding genes in the frontal-polar regions of the cortex is presented. In this study, the right-sided dominance was also found but this time regarding the number of expressed genes associated with the risk of schizophrenia. However, no association with major neurodegenerative diseases was found.

Diagnosis of consciousness has always played an important role in medicine. To date, a communicative contact with the patient remains the main test of the consciousness integrity. Along with that, the significance of objective methods is growing. There are arguments that the modeling of consciousness and the respective implementation are the most important factors of further progress in the area of cognitive technologies and machine “intelligence”.

**Key words:** consciousness; cognitive technologies; cognitive interfaces; active vision; effective brain connections; hippocampus; frontal lobes; hemisphere asymmetry; artificial intelligence.

Измеряй все, что измеримо, а что неизмеримо, делай измеримым.

*Галилео Галилей*

Сегодня когнитивная наука является самой последней версией попыток лучшего понимания работы мозга и сознания. История таких попыток насчитывает несколько столетий. Во второй половине XVI в. станов-

ление физики, а затем и других естественных наук было связано с исключением всех ментальных понятий из научного лексикона. Однако уже в следующем столетии Декарт восстановил сферу ментального (*Res Cogitans*) как область, равноправную физическим явлениям и процессам (*Res Extensa*), подчеркнув первичную данность этой сферы человеку (*Cogito ergo sum*). Более того, опираясь на ранние идеи Аристотеля и собственные анатомические наблюдения, Декарт

высказал предположение о важности непарных структур мозга для реализации высших когнитивных процессов, таких как мышление и рефлексивное сознание [1]. Как первый и ныне действующий президент отечественной Межрегиональной ассоциации когнитивных исследований (МАКИ), мы можем утверждать, что сегодня когнитивная наука не только представляет собой область фундаментальных исследований, но и демонстрирует постоянно расширяющийся спектр практических приложений. Различные научные дисциплины вносят свой вклад — методами, инструментами и моделями — в эти процессы, что находит отражение в широко известном акрониме «НБИКС-конвергенция»<sup>1</sup>.

### Спектр когнитивных технологий

В данной обобщающей статье и дальнейшей серии публикаций нас будут интересовать прежде всего перспективы практических приложений когнитивных исследований. Наиболее амбициозная задача при этом связана с научным пониманием сознания. За последние два-три десятилетия в исследованиях сознания произошло много важных изменений, но, пожалуй, главным является то, что они стали практически значимыми. Это относится как к сенсорному, так и к действенному аспектам сознания, т.е. к изучению, с одной стороны, «феноменальной ясности» осознанных содержаний, а с другой — так называемой агентивности — субъективной свободы выбора принимаемых решений [2]. В эргономике рефлексивная оценка комфортности рабочего места и используемых инструментов трудовой деятельности (*usability* таких инструментов) вышла на первый план. В экономике рыночный успех и эффективность финансовых инвестиций оказались в значительной степени зависящими от психологических aberrаций сознания, «когнитивных иллюзий» [3]. Индивидуальное и социальное сознание находятся в фокусе политехнологий, использующих всю мощь современных средств информационного воздействия на человека.

Нейрокогнитивная революция не обошла стороной и эти области, в результате чего появились новые прикладные дисциплины: нейроэргономика, нейроэкономика и нейромаркетинг. Некоторые из нейрокогнитивных и поведенческих методов развиваются в направлении все более эффективных технологий экспликации индивидуальных знаний и содержания сознания — *mind and brain reading* [4]. Специальной задачей является научная идентификация скрываемого знания и попыток обмана в социально значимых ситуациях. «Внутренний театр» нашего сознания часто включает нескольких действующих лиц. Так, мы заме-

чаем, что ведем с собой или кем-то другим внутренний диалог, смотрим на себя со стороны глазами окружающих, оцениваем других в зависимости от того, как они оценивают нас, пытаемся представить, как бы мы поступили на месте другого либо как другой повел бы себя в нашей ситуации. Интерсубъективность сознания изучается в социальных нейронауках, в частности в том их разделе, который направлен на кросс-культурные и этнопсихологические исследования (*cultural neuroscience*).

Примером прикладной разработки на стыке нескольких направлений когнитивной науки является публикуемая в этом же номере статья В.Э. Карпова и его коллег о роботизированной коляске для инвалидов. Основными особенностями такого устройства являются использование многоуровневой архитектуры управления, психологически обоснованного языка программирования и, наконец, мультимодальных человеко-машинных интерфейсов. Исторически разработка последних стала самой первой задачей прикладных когнитивных исследований. Значительным успехом здесь была замена на рубеже 1990-х годов традиционных интерфейсов командной строки графическими интерфейсами пользователя, что было связано с доказательством значительно большей эффективности памяти на графические изображения («иконки») по сравнению с запоминанием вербального материала, в том числе названий простейших компьютерных операций. Однако в настоящее время такие интерфейсы потеряли значительную долю своей привлекательности. Теперь задача состоит в создании интерфейсов, гибко реагирующих на актуальную направленность внимания пользователя, его знания, интересы и намерения [5].

### Когнитивные интерфейсы для человеко-машинного взаимодействия

Развитие автоматизации не привело пока к исключению человека из большинства технологических процессов, а для целого ряда технологий, ориентированных на самого человека, эта цель в принципе не достижима. Примером могут служить средства поддержки пациентов с тяжелыми нарушениями речи и движений, вплоть до синдрома дезаферентации (англ. *locked-in syndrome*). Около 30 лет назад в этой области появились первые работы, направленные на использование в качестве основы для коммуникативного воздействия регистрации электрофизиологических сигналов мозга (электро- и магнитоэнцефалография — ЭЭГ/МЭГ), движений глаз (айтрекинг) и других необычных каналов связи. Сегодня это одно из наиболее быстро растущих направлений науки и техники. В 2003 г. журнал *Neuropsychology* опубликовал двухстраничное письмо, которое пациент с синдромом дезаферентации писал целых шесть месяцев. Несколько лет спустя другой пациент в таком же состоянии, используя интерфейс мозг-компьютер (ИМК), мог не только общаться с близкими, но и руко-

<sup>1</sup>Ярким примером в этом отношении служит работа Курчатовского комплекса НБИКС-природоподобных технологий, заглавные буквы в названии которого обозначают нанотехнологии, биотехнологии, информационные технологии, а также когнитивные и социальные науки.

водил по электронной почте небольшой лабораторией [6]. Простейшие варианты подобных интерфейсов, предназначенные для компьютерных игр, можно найти сегодня в свободной продаже, а их стоимость доступна большинству пользователей.

В состав ИМК входит устройство для регистрации сигналов мозгового происхождения, а также компьютер с программным обеспечением, которое в режиме, близком к режиму реального времени, анализирует сигналы и распознает в них паттерны, соответствующие определенным командам. При выявлении таких паттернов ИМК посылает ассоциированную с ними команду компьютеру или управляемому им техническому устройству [7, 8]. Взаимодействие с ИМК следует отличать от методик тренировок с помощью биологической обратной связи, в которых перед человеком ставится задача максимизировать те или иные показатели активности мозга или удерживать их в определенном коридоре значений [9]. Результат обработки сигнала мозгового происхождения в биологической обратной связи используется лишь для информирования человека, в то время как в ИМК на его основе осуществляются действия либо в виртуальной, либо в реальной физической среде. Это предъявляет жесткие требования к вычислительным алгоритмам и их программной реализации: они должны в режиме реального времени как можно точнее определять намерение пользователя, используя минимальные объемы данных. В связи с этим бурное развитие технологии ИМК началось лишь в XXI в.

К числу наиболее перспективных для медицинских, а также операторских приложений относятся разработки мультимодальных интерфейсов глаз–мозг–компьютер (ИГМК), развиваемые в НИЦ «Курчатовский институт» [10, 11]. Они позволяют находить признаки произвольного намерения в сигналах ЭЭГ/МЭГ и движениях глаз, преобразуя интенцию в движения робототехнических устройств. Отметим, что в общенаучном контексте решение этой проблемы завещано нам вопросом Декарта «Как мысль о руке поднимает руку?». Именно эта проблема, практически решаемая в наше время методами айтрекинга и электрофизиологии, была когда-то объявлена основателем электрофизиологии Эмилем Дюбуа-Реймоном относящейся к категории «Не знаем и никогда не узнаем». Высокая эффективность ИГМК обусловлена тем обстоятельством, что в его работе используется базовый принцип построения архитектуры зрительной системы, а равно и зрительного внимания млекопитающих — разделение двух систем (или «поточков») обработки информации, связанных с локализацией (вопрос «Где?») и идентификацией объектов (вопрос «Что?»).

### Мозговые механизмы активного зрения

Современные нейрокогнитивные исследования позволяют утверждать, что в каждом когнитивном процессе участвует не одна, а несколько пространственно

распределенных функциональных зон, объединенных в макромасштабные нейросети [12, 13]. Механизмы активного зрения не составляют в этом отношении исключения. Так как в данном случае речь идет о центральной для всех высших приматов и человека модальности, их изучению во всем мире уделяется повышенное внимание. Еще в 1947 г. советский ученый, создатель «физиологии активности» Н.А. Бернштейн, высказал предположение о существовании в эволюционной иерархии структур мозга двух автономных механизмов, а именно уровней «пространственного поля» и «предметного действия» [14]. Лишь десятилетия спустя были описаны две группы похожих по своим функциям механизмов организации зрительного восприятия, которые получили названия дорсального и вентрального потоков переработки информации [15, 16]. Функции этих механизмов как раз и заключаются в решении задач локализации и, соответственно, идентификации, взятых нами за основу архитектуры ИГМК.

Мы говорим в этом разделе статьи об активном зрении, поскольку без глазодвигательной активности зрительное восприятие оказывается невозможным [17]. Но если двойственный характер имеют афферентные механизмы зрения, то, следовательно, аналогичное разделение возможно и для его эфферентных механизмов, проявляющихся в движениях глаз? Действительно, исследования свидетельствуют, что разделению двух зрительных систем соответствует существование двух различных классов движений глаз, проявляющихся в виде амбиентных и фокальных зрительных фиксаций [18, 19]. Первые из них имеют относительно короткую длительность и наблюдаются преимущественно в начале ознакомления с новой пространственной сценой в контексте высокоамплитудных саккад, вторые более продолжительны, включены в состав короткоамплитудных саккад и центрированы на объектах, а не на промежутках между ними.

Практическое значение обнаруженной связи параметров фиксаций с характером обработки зрительной информации исключительно велико. Так, наблюдая характер движений глаз водителя, можно с высокой степенью вероятности определить, способен ли он идентифицировать возникшую в его поле зрения опасную ситуацию или в этот момент он находится в амбиентном режиме восприятия (внимания), и, следовательно, контроль за движением автомобиля следует немедленно передать системам искусственного интеллекта [20].

Вопрос о мозговых механизмах этих режимов восприятия и внимания все еще остается дискуссионным. Из общих соображений можно предположить решающую роль структур дорсального и вентрального потоков. Однако прямая экспериментальная проверка этого предположения оказалась затруднительной. Метод ЭЭГ недостаточно точен в пространственном отношении, тогда как главный инструмент современных нейрокогнитивных исследований, функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ), имеет слишком низкое временное разрешение, чтобы быть

соотнесенной с быстро сменяющимися друг друга зрительными фиксациями. Более того, недавно было проведено исследование, в котором методом транскраниальной доплеровской сонографии анализировалась интенсивность кровотока к левому и правому полушарию головного мозга в процессе рассматривания сложных изображений [21]. Оказалось, что в первые 1–2 с после показа, когда параметры зрительных фиксаций свидетельствуют о доминировании AMBIENTНОЙ обработки, более интенсивно работает правое полушарие. Затем параллельно с ростом числа фокальных фиксаций межполушарная асимметрия кровотоков выравнивается либо смещается влево.

В настоящее время существуют две гипотезы, объясняющие наблюдаемую картину смены режимов движений глаз при свободном рассматривании изображений. Первая из них, сформулированная нами свыше 15 лет назад, объясняет это динамикой взаимодействия дорсального и вентрального потоков переработки информации. Вторая гипотеза [21] связывает эту картину с межполушарными различиями. Применив уникальное сочетание протокола ультрабыстрого фМРТ-сканирования с методом связанных с событиями фиксаций (fixation-based event-related, FIBER), мы впервые смогли проанализировать работу мозга при свободном рассматривании сложных изображений в связи с возникновением AMBIENTНЫХ и фокальных зрительных фиксаций [22]. Полученные результаты неожиданно подтвердили обе точки зрения. Как и предполагалось нами ранее, AMBIENTНЫЕ зрительные фиксации сопровождаются активацией классических структур дорсального, а фокальные — вентрального потоков. Вместе с тем справедливой оказывается и вторая точка зрения: активированные структуры дорсального потока были локализованы в правом, а вентрального — преимущественно в левом полушарии.

### Асимметрия головного мозга человека в норме и при патологии

Описанные в предыдущем разделе данные, по-видимому, говорят о каком-то чрезвычайно важном принципе организации работы мозга человека. Быстрая глобальная ориентация в новой ситуации обеспечивается работой механизмов правого полушария, причем не только структурами дорсального потока, расположенными в новой коре, но и значительно более старыми в эволюционном отношении отделами мозга, к которым в конечном счете нисходит дорсальный поток. Важнейшей их частью является гиппокамп — парная структура архикортекса, древнейшей коры головного мозга<sup>2</sup>. По мере

<sup>2</sup>Гиппокамп привлекает пристальное внимание ученых всего мира в связи с его ролью в процессах эпизодического запоминания и ориентации в пространстве. За исследование нейронов гиппокампа у крыс как основы «когнитивной карты» окружения Джон О'Киф, Майбрит и Эдвард Мозеры получили в 2014 г. Нобелевскую премию по физиологии и медицине.

ознакомления с ситуацией происходит подключение механизмов более рутинной, отработанной ранее обработки, к числу которых относятся и речевые алгоритмы, связанные преимущественно с левым полушарием. Такие переходы, как показывает динамический баланс AMBIENTНОГО и фокального режимов обработки, могут происходить в субсекундном темпе.

Использование новых нейрокогнитивных подходов позволило нам впервые описать взаимодействие гиппокампа с другими областями головного мозга человека [23]. Суть нашей работы заключалась в изучении ЭФФЕКТИВНЫХ (причинно-следственных) связей левого и правого гиппокампов человека с основными структурами так называемой дефолтной нейросети (default mode network). Дефолтная нейросеть обеспечивает работу мозга в базовом для сознания человека состоянии бодрствующего покоя и включает медиальную префронтальную кору, заднюю часть поясной извилины, а также нижнюю теменную кору головного мозга левого (LIPC) и правого (RIPC) полушарий. Две последние структуры объединяют интермодальную (зрительную, слуховую, вестибулярную и тактильную) информацию о контралатеральной половине пространственного окружения: LIPC — о правом полупространстве, а RIPC — о левом полупространстве.

В состоянии покоя у группы 30 здоровых праворуких испытуемых были записаны данные фМРТ. Для расчета ЭФФЕКТИВНЫХ связей головного мозга использовали математический метод спектрального динамического каузального моделирования. Проверка предсказаний результатов более 3000 количественных моделей позволила обнаружить доказательства выраженной асимметричности в работе левого и правого гиппокампов, которая была неизвестна из работ, проводившихся на животных. Хотя обе эти структуры весьма активны, правый гиппокамп обладает уникальным свойством: он получает информацию из обоих интермодальных центров, LIPC и RIPC. Это служит основой для целостного представления окружения. Левый гиппокамп, напротив, связан только с LIPC, поэтому его «знание» об окружении ограничено правым полупространством. Такая латерализация ЭФФЕКТИВНЫХ связей объясняет одно из наиболее частых нарушений сознания, наблюдаемых в клинике у пациентов с поражениями правого полушария, а именно левостороннее игнорирование полупространства (left-sided hemineglect). Как правило, травмы левого полушария не приводят к аналогичным выпадениям восприятия правой половины окружения.

Следующая работа позволила распространить этот анализ на взаимодействия между разными уровнями организации мозга человека, включающими древнейшую, древнюю, новую и новейшую кору [24]. Под «новейшей корой» мы имеем в виду наиболее быстро растущие в антропогенезе фронтальнополярные области лобных долей мозга, или левую и правую зоны BA10 по Бродману. Оказалось, что правосторонняя латерализация каузальных связей в состоянии покоя

является достаточно общим правилом внутри- и межуровневых взаимодействий. Кроме того, наблюдалась тенденция контроля эволюционно более старых структур со стороны более новых. Явным исключением был лишь правый гиппокамп, в случае которого выявлено его восходящее влияние на более молодые структуры, включая фронтополярную кору. В настоящее время нами закончено исследование взаимодействия тех же структур мозга в состоянии покоя у пациентов с шизофренией [25]. Основной результат этой новой работы состоит в том, что она не выявила известной нам из нормы картины правосторонней латерализации каузальных связей. Этот вывод, очевидно, клинически релевантен, так как говорит о важности межполушарной асимметрии в нормальном функционировании мозга и сознания человека.

### Вместо заключения: сознание и искусственный интеллект

В статье представлен обзор текущих нейрокогнитивных исследований, объединяющих фундаментальные вопросы с практическими приложениями в медицине и смежных областях. В силу ограниченного объема публикации мы смогли остановиться лишь на тех исследованиях, которые связаны с изучением макромасштабных механизмов мозга<sup>3</sup>. Столь же интенсивные когнитивные работы ведутся в области «мокрой нейрофизиологии» (например, в отношении поиска ранних иммунологических маркеров нейродегенеративных нарушений когнитивных функций) [28]. Более того, имеются данные, говорящие о том, что особенности макромасштабной организации могут и должны быть соотнесены с молекулярными механизмами соответствующих отделов мозга человека. Например, под нашим руководством изучены особенности экспрессии белок-кодирующих генов во фронтополярных отделах лобной коры человека [29]. Эти исследования также выявили правостороннее доминирование, но на этот раз в числе экспрессирующихся генов. Отметим, что эти гены оказались связанными с риском шизофрении, но не основных нейродегенеративных заболеваний. Со временем можно ожидать идентификацию молекулярных механизмов сознания.

Диагностика сознания всегда играла важнейшую роль в медицине. По сегодняшний день коммуникативный контакт с пациентом остается основным тестом сохранности сознания. Одновременно растет значение объективных методов, объединяющих данные когнитивных нейронаук и математические модели. Примером служит реализация теории интегративной информации [30], в которой сознание рассматривает-

<sup>3</sup>Даже внутри этого направления нам пришлось отказаться от обсуждения некоторых важных тем, таких, например, как нейролингвистическое картирование семантики и синтаксиса русского языка [26] и разработка новых методов нейровизуализации [27].

ся как единая, субъективно самоощущаемая субстанция. Данный взгляд на сознание был выражен с помощью количественного коэффициента, оценивающего комбинаторную сложность ответов мозга на транскраниальную магнитную стимуляцию. Использование этого коэффициента позволяет различать пациентов, находящихся в состояниях ясного сознания, сна с движениями глаз, сна без движений глаз, наркоза и комы [31]. Точность такой количественной диагностики могла бы быть значительно улучшена с учетом полученных нами данных об особенностях эффективного коннектома головного мозга человека.

Декарт первым высказал предположение о связи рефлексивного мышления с некоторым непарным органом (*sensus communis*), который он, впрочем, локализовал неправдоподобно низко с точки зрения последующих эволюционных представлений — в структурах среднего мозга. Открытие левосторонней асимметрии речевых механизмов в XIX в. и уже в наше время — многочисленных форм латерализации, связанных и с правым полушарием, позволяет при сохранении логики рассуждений Аристотеля и Декарта искать возможное место для подобного интерфейса в целом ряде других структур. Наиболее вероятным из них в данный момент нам представляется правый гиппокамп [24, 32]. Отметим, что через несколько месяцев после нашей последней публикации были опубликованы результаты обширного анализа функциональных связей дефолтной нейросети, также выявившего необычное разнообразие связей правого гиппокампа по сравнению с его аналогом в левом полушарии [12].

Прорывной областью технологического развития сегодня становится машинное обучение. На базе использования алгоритмов «глубокого обучения» искусственных нейросетей с промежуточными слоями и высокопроизводительных графических процессоров удалось на приемлемом уровне решить такие десятилетиями не поддававшиеся решению задачи, как распознавание речи, компьютерное зрение и машинный перевод. В играх с фиксированным набором правил машины уже сейчас демонстрируют сверхчеловеческие способности, которые быстро прогрессируют с ростом компьютерных мощностей. Несмотря на впечатляющие успехи, у этого поколения программных продуктов все еще отсутствуют характерные для человеческого интеллекта гибкость и способность работать в новых условиях. Так, хотя программа AlphaGO и позволила недавно обыграть мирового чемпиона по игре Го, для этого ей понадобился просмотр порядка 100 млн. игровых ситуаций, тогда как сам чемпион, по видимому, опирался на опыт менее чем 50 тыс. партий [33].

Эти различия между машиной и человеком имеют качественный, а не просто количественный характер. Игрок средней квалификации способен начать играть по *ad hoc*-правилам и в необычных условиях — с доской другого размера или формы (напри-

мер, представляющей собой поверхность ленты Мебиуса). Такие изменения блокируют «машинный интеллект», причем преодолеть блокировку можно лишь усилиями высококлассных программистов и с помощью новой фазы продолжительного обучения. Гибкость и способность работать в новых условиях относятся к конституирующим свойствам сознания, определяющим творческий потенциал человеческого мышления. Моделирование сознания и соответствующая имплементация представляют собой, таким образом, важнейшее условие развития работ в области когнитивных технологий и машинного «интеллекта». Иными словами, там, где этого не случилось ранее, проблема сознания начинает занимать центральное положение как крупнейшая проблема науки и ее практических приложений.

**Финансирование исследования.** Работа частично выполнена при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт» (внутренние проекты №1378 от 23 августа 2017 г. и №1649 от 11 июля 2018 г.), а также грантов Российского научного фонда (№17-78-30029, нейрорелигиозное картирование мозга) и Российского фонда фундаментальных исследований (№17-29-02518, когнитивные архитектуры мозга в норме и у больных шизофренией).

**Конфликт интересов** отсутствует.

#### Литература/References

1. Велихов Е.П., Котов А.А., Лекторский В.А., Величковский Б.М. Междисциплинарные исследования сознания: 30 лет спустя. *Вопросы философии* 2018; 12: 5–17. Velikhov E.P., Kotov A.A., Lectorsky V.A., Velichkovsky B.M. Interdisciplinary consciousness research: 30 years on. *Voprosy filosofii* 2018; 12: 5–17, <https://doi.org/10.31857/s004287440002578-0>.
2. Величковский Б.М. Сознание. В кн.: Большая российская энциклопедия. Том 30. М.; 2015; с. 623–626. Velichkovsky B.M. Soznanie. V kn.: *Bolshaya Rossiyskaya entsiklopediya*. Tom 30 [Consciousness. In: Great Russian encyclopedia. Vol. 30]. Moscow; 2015; p. 623–626.
3. Kahneman D. *Thinking, fast and slow*. New York: Farrar, Straus & Giroux; 2011.
4. Величковский Б.М. От исследований сознания к разработке когнитивных технологий. В кн.: Субъективный мир в свете вызовов современной когнитивной науки. Отв. ред. Лекторский В.А. М: Аквилон; 2017; с. 37–57. Velichkovsky B.M. Ot issledovaniy soznaniya k razrabotke kognitivnykh tekhnologiy. V kn.: *Subektivnyy mir v svete vyzovov sovremennoy kognitivnoy nauki* [From consciousness exploration to the development of cognitive technologies. In: Subjective world in light of modern cognitive science challenges]. Otv. red. Lektorskiy V.A. [Lektorskiy V.A. (editor)]. Moscow: Akvilon; 2017; p. 37–57.
5. Velichkovsky B.M., Hansen J.P. New technological windows into mind. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems common ground — CHI '96*. ACM Press; 1996; p. 496–503, <https://doi.org/10.1145/238386.238619>.
6. Sellers E.W., Vaughan T.M., Wolpaw J.R. A brain-computer interface for long-term independent home use. *Amyotroph Lateral Scler* 2010; 11(5): 449–455, <https://doi.org/10.3109/17482961003777470>.
7. Kaplan A.Y., Lim J.J., Jin K.S., Park B.W., Byeon J.G., Tarasova S.U. Unconscious operant conditioning in the paradigm of brain-computer interface based on color perception. *Int J Neurosci* 2005; 115(6): 781–802, <https://doi.org/10.1080/00207450590881975>.
8. Wolpaw J.R. Brain-computer interfaces as new brain output pathways. *J Physiol* 2007; 579(3): 613–619, <https://doi.org/10.1113/jphysiol.2006.125948>.
9. Белоусов Л.С., Напалков Д.А., Жигульская Д.Д., Пешин Н.Л., Величковский Б.М. Когнитивные исследования и новые технологии в спорте. *Вопросы психологии* 2018; 5: 117–135. Belousov L.S., Napalkov D.A., Zhigulskaja D.D., Peshin N.L., Velichkovsky B.M. Cognitive research and new technologies in sport. *Voprosy psikhologii* 2018; 5: 117–135.
10. Величковский Б.М., Нуждин Ю.О., Свирин Е.П., Строганова Т.А., Федорова А.А., Шишкин С.Л. Управление «силой мысли»: на пути к новым формам взаимодействия человека с техническими устройствами. *Вопросы психологии* 2016; 1: 109–122. Velichkovsky B.M., Nuzhdin Yu.O., Svirin Ye.P., Stroganova T.A., Fedorova A.A., Shishkin S.L. Control by “power of thought”: towards new forms of human interaction with technical devices. *Voprosy psikhologii* 2016; 1: 109–122.
11. Shishkin S.L., Nuzhdin Y.O., Svirin E.P., Trofimov A.G., Fedorova A.A., Kozyrskiy B.L., Velichkovsky B.M. EEG negativity in fixations used for gaze-based control: toward converting intentions into actions with an eye-brain-computer interface. *Front Neurosci* 2016; 10: 528, <https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00528>.
12. Kernbach J.M., Yeo B.T.T., Smallwood J., Margulies D.S., Thiebaut de Schotten M., Walter H., Sabuncu M.R., Holmes A.J., Gramfort A., Varoquaux G., Thirion B., Bzdok D. Subspecialization within default mode nodes characterized in 10,000 UK Biobank participants. *Proc Natl Acad Sci U S A* 2018; 115(48): 12295–12300, <https://doi.org/10.1073/pnas.1804876115>.
13. Verkhlyutov V.M., Sokolov P.A., Ushakov V.L., Velichkovskii B.M. Macroscopic functional networks in the human brain on viewing and recalling short video clips. *Neurosci Behav Physi* 2016; 46(8): 934–941, <https://doi.org/10.1007/s11055-016-0334-6>.
14. Бернштейн Н.А. О построении движений. М: Медгиз; 1947. Bernshteyn N.A. *O postroenii dvizheniy* [On construction of movements]. Moscow: Medgiz; 1947.
15. Milner A.D., Goodale M.A. Visual pathways to perception and action. *Prog Brain Res* 1993; 95: 317–337, [https://doi.org/10.1016/s0079-6123\(08\)60379-9](https://doi.org/10.1016/s0079-6123(08)60379-9).
16. Velichkovsky B.M. Towards an evolutionary framework for human cognitive neuroscience. *Biol Theory* 2007; 2(1): 3–6, <https://doi.org/10.1162/biot.2007.2.1.3>.
17. Yarbus A.L. *Eye movements and vision*. Springer US; 1967, <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-5379-7>.
18. Ito J., Yamane Y., Suzuki M., Maldonado P., Fujita I., Tamura H., Grün S. Switch from ambient to focal processing mode explains the dynamics of free viewing eye movements. *Sci Rep* 2017; 7(1): 1082, <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01076-w>.
19. Velichkovsky B.M., Joos M., Helmert J.R., Pannasch S. Two visual systems and their eye movements: evidence from static and dynamic scene perception. In: Bara B.G.,

Barsalou L., Bucciarelli M. (editors). *Proceedings of the XXVII annual conference of the Cognitive Science Society*. Mahwah: Lawrence Erlbaum 2005; p. 2283–2288.

20. Velichkovsky B.M., Rothert A., Kopf M., Dornhöfer S.M., Joos M. Towards an express-diagnostics for level of processing and hazard perception. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour* 2002; 5(2): 145–56, [https://doi.org/10.1016/s1369-8478\(02\)00013-x](https://doi.org/10.1016/s1369-8478(02)00013-x).

21. Mills M., Alwatban M., Hage B., Barney E., Truemper E.J., Bashford G.R., Dodd M.D. Cerebral hemodynamics during scene viewing: hemispheric lateralization predicts temporal gaze behavior associated with distinct modes of visual processing. *J Exp Psychol Hum Percept Perform* 2017; 43(7): 1291–1302, <https://doi.org/10.1037/xhp0000357>.

22. Velichkovsky B.M., Korosteleva A., Malakhov D., Ushakov V.L. Two visual systems and their eye movements revisited. *In preparation*.

23. Ushakov V., Sharaev M.G., Kartashov S.I., Zavyalova V.V., Verkhlyutov V.M., Velichkovsky B.M. Dynamic causal modeling of hippocampal links within the human default mode network: lateralization and computational stability of effective connections. *Front Hum Neurosci* 2016; 10: 528, <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00528>.

24. Velichkovsky B.M., Krotkova O.A., Kotov A.A., Orlov V.A., Verkhlyutov V.M., Ushakov V.L., Sharaev M.G. Consciousness in a multilevel architecture: evidence from the right side of the brain. *Conscious Cogn* 2018; 64: 227–239, <https://doi.org/10.1016/j.concog.2018.06.004>.

25. Ushakov V.L., Velichkovsky B.M., Sharaev M.G., Kartashov S.I., Orlov V.A., Malakhov D.G., Zakharova N.V., Maslennikova A.V., Arkhipov A.Yu., Strelets V.B., Kostyuk G.P. Multilevel interactions within the extended default mode network of schizophrenic patients under fMRI resting state. *In preparation*.

26. Ushakov V.L., Orlov V.A., Kartashov S.I., Malakhov D.G., Korosteleva A.N., Skiteva L.I., Zaidelman L.Ya., Zinina A.A., Zobotkina V.I., Velichkovsky B.M., Kotov A.A. Contrasting human brain responses to literature descriptions of nature

and to technical instructions. In: *Studies in computational intelligence*. Springer International Publishing; 2018; p. 284–290, [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01328-8\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01328-8_34).

27. Knyazeva I., Poyda A., Orlov V., Verkhlyutov V., Makarenko N., Kozlov S., Velichkovsky B., Ushakov V. Resting state dynamic functional connectivity: network topology analysis. *Biologically Inspired Cognitive Architectures* 2018; 23: 43–53, <https://doi.org/10.1016/j.bica.2017.10.001>.

28. Malashenkova I.K., Hailov N.A., Krynskiy S.A., Ogurtsov D.P., Kazanova G.V., Velichkovskiy B.B., Selezneva N.D., Fedorova Y.B., Ponomareva E.V., Kolyhalov I.V., GavriloVA S.I., Didkovsky N.A. Levels of proinflammatory cytokines and growth factor VEGF in patients with Alzheimer's disease and mild cognitive impairment. *Neurosci Behav Physi* 2017; 47(6): 694–698, <https://doi.org/10.1007/s11055-017-0457-4>.

29. Dolina I.A., Efimova O.I., Kildyushov E.M., Sokolov A.S., Khaïtovich P.E., Nedoluzhko A.V., Sharko F.S., Velichkovsky B.M. Exploring terra incognita of cognitive science: lateralization of gene expression at the frontal pole of the human brain. *Psychology in Russia: State of the Art* 2017; 10(3): 231–247.

30. Tononi G. Integrated information theory of consciousness: an updated account. *Arch Ital Biol* 2012; 150(2–3): 56–90.

31. Casali A.G., Gosseries O., Rosanova M., Boly M., Sarasso S., Casali K.R., Casarotto S., Bruno M.A., Laureys S., Tononi G., Massimini M. A theoretically based index of consciousness independent of sensory processing and behaviour. *Sci Transl Med* 2013; 5(198): 198ra105, <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3006294>.

32. Velichkovsky B.M., Krotkova O.A., Sharaev M.G., Ushakov V.L. In search of the “I”: neuropsychology of lateralized thinking meets dynamic causal modeling. *Psychology in Russia: State of the Art* 2017; 10(3): 7–27.

33. Lake B.M., Ullman T.D., Tenenbaum J.B., Gershman S.J. Building machines that learn and think like people. *Behav Brain Sci* 2017; 40: e253, <https://doi.org/10.1017/s0140525x16001837>.