

УДК 621.382 + 612 + 159.922

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
Минск, Республика Беларусь, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ И МЕДИЦИНЕ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА*

Поступила в редакцию 12.08.2015

Оценены перспективы использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологии в исследовании и медицине мозга человека в рамках предложенной полной электронной интерпретации его функционирования. Проанализированы главные программы США и стран ЕС по изучению мозга человека — BRAIN Initiative и Human Brain Project.

Ключевые слова: нанoeлектроника, наноматериалы, нанотехнологии, мозг человека, полная электронная интерпретация, комплексный иерархический подход, коннектом человека, нейрокибернетический подход

*Посвящаю светлой памяти моей мамы —
Ганьши (Адукевич) Галицы Казимировны — бывшей малолетней узницы
фашистских концентрационных лагерей Освенцим, Бухенвальд и Берген-Бельзен.*

Введение

Фантастическим по сложности объектом во Вселенной является мозг человека. Так, число нервных клеток $10^{10} \dots 10^{12}$, число синапсов $10^{14} \dots 10^{15}$, еще большее число ионных каналов и молекул (около 10^{22} на 1 см^3), являющихся ключевыми структурами. Впечатляют и объемы памяти мозга по запоминанию информации. Существуют самые разные оценки: $10^{15} \dots 10^{16}$ бит [1]; $10^9 \dots 10^{12}$ бит [2]. Еще более потрясающая оценка общего количества информации по числу возможных нейронных состояний приведена в работе [3]: 2^{NK} , где N — полное число нейронов ($N = 10^{11}$); K — число поколений срабатывания ($K \gg 1$), т. е. действительно имеем "астрономическое число".

Особенным результатом функционирования этой суперсложной информационной системы является сознание** — главная загадка Природы. Недаром лауреат Нобелевской премии Виталий Лазаревич Гинзбург "вопрос о возможности объяснить происхождение жизни и мышления на основе

* Статья является текстом пленарного доклада, прочитанного на 25-й Международной конференции "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии", 6—12 сентября, 2015 г., Севастополь, Крым, Россия.

** Здесь становится очевидной справедливость диалектического закона о переходе количества в качество.

одной физики" отнес к одной из трех "великих" проблем современной физики" [4].

Целью данной статьи является анализ перспектив использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека, а также главных программ*** США и стран ЕС по его изучению — BRAIN Initiative и Human Brain Project. Методологической основой проведенного рассмотрения являются предложенные автором полная электронная интерпретация функционирования мозга и комплексный иерархический подход его исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами.

Программы США и стран ЕС исследования мозга

Приблизительно одновременно в 2013 г. было объявлено о начале двух грандиозных по масштабам и амбициозных по целям программ США и стран ЕС исследований мозга человека.

BRAIN (*Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*) Initiative была анонсирована президентом США Б. Обамой в апреле 2013 г. [5] с общим объемом финансирования до 3 млрд долл.

*** Автор использует здесь более верный по смыслу перевод на русский язык — "программа".

из федерального бюджета. Инициатива была названа одним из "Великих Вызовов". Ожидается, что она будет более масштабной и сложной по сравнению с *Human Genome Project*. Одним из основных направлений будет картирование всех связей нейронов мозга человека (создание коннектома человека). Полагается, что с помощью коннектома мозга можно будет сначала разобраться во многих психических заболеваниях (болезнь Альцгеймера, болезнь Паркинсона, шизофрения, слабоумие и др.), а впоследствии и лечить их. Предтечей этой инициативы являлся *Human Connectome Project*, осуществляемый Национальным институтом здоровья США [6]. Составление карты начали с нервной системы червя (*C. elegans*), содержащей всего 7 тыс. связей. Замечу, что коннектом человека приблизительно в 100 млрд раз больше. Подробно работы по коннектому описаны в интересной книге профессора С. Сеунга [6].

Human Brain Project (HBP) анонсирован Европейской комиссией практически одновременно с Инициативой США с общим объемом финансирования около 1,2 млрд евро. Понимание мозга человека в программе названо "одним из величайших вызовов науки 21-го века" [7]. HBP включает 13 подпрограмм. Одним из основных направлений будет создание модели человеческого мозга на транзисторах (поведение нейронов имитируется с помощью транзисторов) с привлечением суперкомпьютеров. Данный подход фактически является нейрокибернетическим.

В целом, отмеченные подходы являются своеобразным "движением навстречу друг другу" и возникли не на пустом месте, а являются продолжением ранее выполняемых проектов, а именно [3] *Human Connectome Project*, *Blue Brain*, проект фирмы *IBM*, *Allen Human Brain Atlas* и др.

В данном разделе ограничусь лишь перечислением наиболее существенных недостатков основных направлений (подходов)* указанных глобальных программ, которые отмечены, как правило, руководителями или участниками проектов (см., например [3, 6]).

О коннектомике. К основным недостаткам подхода отнесу следующие.

1. Очень длительные сроки получения коннектома. Так, на получение единственного законченного к настоящему времени коннекта червя (см. ранее) потребовалось десятилетие.

2. Пока возможно отыскивать коннектом только с мертвого мозга.

* Проанализировать все проекты программ просто невозможно хотя бы потому, что в них принимают участие очень большое число специалистов Запада, включая ведущих, в различных областях нейронауки. А это означает, что прорывные результаты могут быть получены по другим направлениям.

3. Полное количество информации по мнению профессора Сеунга в коннектоме человека составляет около 10^{20} байт. И, вообще говоря, неясно, что с ней делать. В результате профессор Сеунг отчаивается когда-нибудь завершить проект, учитывая не только сложности получения информации, но и ее обработки (проблема расшифровки коннектома). Сомнения у него есть и в самой теории коннектома, главным принципом которой является [6]: "Функция нейрона определяется главным образом его связями с другими нейронами". Как будет видно из дальнейшего, эти сомнения небезосновательны.

О нейрокибернетическом подходе. К основным недостаткам этого подхода отнесу следующие: 1) моделируются только связи между корой и таламусом, т. е. большая часть мозга не рассматривается; насколько такое моделирование отражает реальную ситуацию — неясно; 2) в настоящее время нет суперкомпьютеров требуемой производительности, поэтому подход реализуется поэтапно, начиная с моделирования мозга более простых животных, в частности мыши.

Итак, общими недостатками обоих основных подходов являются: 1) очень длительные сроки, которые потребуются для получения информации непосредственно о мозге человека; 2) просто чудовищные объемы возможной получаемой информации, на которые потребуется, по-видимому, не меньше времени, чтобы в ней разобраться. Что она означает?

Завершая данный раздел не могу не заметить, что хороший обзор наиболее важных исследований по мозгу, выполненных в России, дан на научной сессии Общего собрания Российской Академии наук "Мозг: фундаментальные и прикладные проблемы" [8]. Хотя в Программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013—2020 годы и уделено рассматриваемой проблеме серьезное внимание, однако, к сожалению, это не привело к созданию столь же глобальной программы по исследованию мозга по сравнению с отмеченными ранее.

Полная электронная интерпретация функционирования мозга

В докладах автора на международных конференциях [9—11], монографиях [12, 13] и цикле статей [14—17] описан комплексный иерархический подход к исследованию мозга человека, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами, в рамках полной электронной интерпретации его функционирования. Так как предложенные интерпретация и комплексный подход достаточно подробно описаны в работах [12, 13]; здесь выделю лишь основ-

ные моменты, которые будут важны для дальнейшего изложения.

Основная сложность рассмотрения функционирования мозга, особенно различных психических функций, на строгом нейрофизиологическом уровне связана с тем, что при его работе имеет место "запутанный клубок" большого числа физико-химических процессов. В связи с этим была принята **гипотеза 1**: *считается, что доминирующее влияние на функционирование мозга оказывают электрические процессы.* Таким образом, полагается, что обработка информации в мозге идет в основном на уровне электрических процессов. Другой вид принципиально важных процессов, т. е. химические, обеспечивает прежде всего питание нейронных (электрических) цепей мозга, а также их модификацию (см. также далее).

Было впервые показано, что вся нейронная цепь мозга может интерпретироваться в качестве нелинейной электрической цепи (цепь первого типа), имеющей следующие свойства: 1) нейронная цепь — это сначала растущая, а затем модифицируемая электрическая цепь (основное отличие от интегральных схем (ИС) — электрических цепей второго типа); 2) нелинейная электрическая цепь первого типа характеризуется не только крайне сложной топологией, но и вариацией свойств составляющих ее казалось бы однотипных элементов (тела клеток, аксона, дендриты, шипики, синапсы и др.); 3) электрические цепи первого типа могут демонстрировать большое разнообразие в поведении в зависимости как от входящих, так и от проходящих по ним сигналов; 4) с точки зрения электроники мозг зрелого человека — это, прежде всего, набор нелинейных электрических (нейронных) цепей двух видов, которые не должны модифицироваться и которые могут модифицироваться.

Так как ключевыми элементами в электрических (нейронных) цепях мозга являются ионные каналы — сложные наноэлектромеханические системы (НЭМС), то мозг в целом был интерпретирован не как просто объект электроники, а как объект органической гибридной наноэлектроники [12, 13]. Отмечу здесь принципиальное отличие от ИС твердотельной микро- и наноэлектроники. В них ключевые (активные) элементы — диоды и транзисторы. Таким образом, Природа пошла по другому сильно отличающемуся пути.

В рамках предложенной полной электронной интерпретации функционирования мозга рассмотрено как приблизительно функционирует мозг. Выделено три типа режима работы мозга как набора нелинейных электрических цепей, а именно: 1) при внешнем воздействии; 2) без внешнего воздействия (внутренний); 3) смешанный. При этом все отдельные режимы работы мозга, включая восприятие, воспоминание, мышление и другие психи-

ческие функции, относятся к одному из указанных типов. Более того, любой специфический режим работы мозга является результатом прохождения электрического сигнала (сигналов) по соответствующему набору электрических цепей, причем основными возможными операциями являются сравнение, кодирование, декодирование, команда к действию, модификация нейронных цепей.

Так, мысль — это декодирование (внутреннее воспроизведение) электрического сигнала (сигналов), инициированных самим мозгом и проходящего по различным нейронным цепям мозга соответствующей пространственно-временной конфигурации. Следовательно, мысль — это своеобразный обратный процесс по отношению к обработке поступающей информации (прямой процесс), который инициируется, по-видимому, в основном корой головного мозга, т. е. по нейронным цепям проходят токи и возникают образы, понятия и т. п. в результате декодирования информации, содержащейся в соответствующих нейронных цепях.

Сделаем некоторые дополнения и уточнения к теории, изложенной в работах [12, 13] и кратко описанной выше.

Современные экспериментальные данные исследования мозга [3] позволяют сделать вывод о том, что, по-видимому, областью, прежде всего отвечающей за осознание, является префронтальная кора лобной доли головного мозга человека*. Таким образом, инициация и возможное сопровождение мыслительной деятельности происходит в нейронных цепях этой области, а далее осуществляется гибкое связывание (см. далее) с нейронными цепями различных структур и областей мозга в зависимости от того какая это мысль. Если в результате этой мысли происходит какое-то действие, то для его осознания необходимо, чтобы информация поступила для обработки в префронтальную кору. В результате происходит естественная задержка, которая в нейрофизиологической литературе вызвала очень бурную дискуссию (известный эксперимент 1985 года Б. Либета "о свободе воли" [3]). Получается, что мы сначала действуем, а потом осознаем это. В свете изложенного выше эта часто встречаемая задержка становится понятной. Отмечу, что в конечном итоге все же мозг принимает решение, а не кто-то потусторонний. В связи с этим резкое противопоставление сознательной и подсознательной деятельности мозга с моей точки зрения неверно. Основное различие состоит главным образом в том, что в случае осознания той либо иной деятельности необходимо обязательное участие нейронных цепей еще од-

* Не следует, однако, забывать, что "ключевое значение для нормального функционирования сознания" имеют "кора больших полушарий, таламус и функциональные связи между этими областями мозга" [18]. Это подчеркивает особую важность принципа системности в работе мозга [19].

ной области — префронтальной коры. В то же время известно, что подавляющее число действий человека осуществляется на подсознательном уровне и только очень незначительная часть выходит на сознательный уровень. В последнем случае может существенно улучшаться качество деятельности. Расплатой за это, однако, является отмеченная задержка вследствие необходимости участия в обработке информации еще, как минимум, одной области мозга, отвечающей за осознание. Понятно, что в некоторых случаях это не нужно либо может быть просто вредным, поэтому многие действия человека происходят в автоматическом режиме (на подсознательном уровне).

Очень интересной является "проблема связанности" [3] между нейронными цепями различных областей мозга в процессе его функционирования. Отмечу, что гибкость связывания достигается, по крайней мере, на трех уровнях: 1) связей между областями и/или структурами; 2) нейронных ансамблей (в областях и структурах могут участвовать в работе разнообразные нейронные ансамбли); 3) нейронов (полифункциональны и сами нейроны). Это, конечно же, сильно усложняет анализ. В свете предложенной полной электронной интерпретации мне представляется весьма убедительной (ввиду общего колоссального числа нейронов) разрабатываемая теория о синхронизации колебаний в нейронных цепях различных участков мозга [3]. Впервые идея, по-видимому, была высказана еще А. А. Ухтомским, а впоследствии развивалась Ф. Криком и К. Кохом, В. Зингером и Д. Эдельманом и др. Было установлено, что для сознательной деятельности важны гамма-волны с частотой около 40 Гц. Ранее [12, 13] мною уже отмечалось, что "мыслительная деятельность, судя по всему, — суть макроскопические коллективные явления в нелинейных электрических цепях первого типа" и носит как бы резонансный характер. Эти взгляды неплохо согласуются с теорией о синхронизации колебаний.

В соответствии с удачной классификацией А. Ревонсуо [20] предложенная теория [12, 13] может быть отнесена к монистической материалистической теории сознания эмерджентного типа. В ней, как только что отмечалось, специфические процессы более высокого уровня — макроскопические коллективные явления в нелинейных электрических (нейронных) цепях мозга.

Комплексный подход к исследованию мозга

Предложенная полная электронная интерпретация функционирования мозга послужила базой для комплексного иерархического подхода к его исследованию, основанного на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами и описанного в работах [12, 13].

Для разработки подхода потребовалось введение еще двух гипотез [12, 13]. Так, были приведены аргументы в пользу того, что, с одной стороны, психические функции мозга не могут быть описаны точно с помощью квантовой механики в принципе, а с другой стороны, — *функционирование мозга может быть в принципе описано с высокой степенью точности (достаточной) с применением формализма квантовой механики на современном уровне ее развития*. Последнее утверждение — **гипотеза 2** о достаточности квантовой механики. Были также приведены аргументы в пользу справедливости **гипотезы 3: строгое математическое описание работы мозга с помощью квантовой механики относится к труднорешаемым задачам класса NP**. Таким образом, строгое моделирование мозга на уровне квантовой механики невозможно сейчас и в обозримом будущем. Рациональный выход из создавшейся ситуации — комплексный иерархический подход на основе многоуровневого моделировании мозга в сочетании с экспериментальными методами. Одна из возможных схем реализации такого подхода описана в работах [12, 13].

Важным преимуществом предложенного подхода и схемы является возможность учета влияния различных "химических, тепловых и других значимых процессов" и воздействий [12, 13], т. е. их свойство открытости. В частности, допустимо учесть влияние следующих факторов: глиальных клеток, которых приблизительно в 10 раз больше, чем нейронов; объемных токов [20]; возможные модификации в нейронных цепях, так, недавно установлено, что в результате воспоминаний (внутренний режим работы мозга согласно предложенной интерпретации [12, 13]) может изменяться структура белка [3] и других. Для этого потребуются разработка соответствующих моделей. Замечу, что даже в отмеченных факторах еще много неясностей. Однако возможны достаточно простые пути учета таких, как правило, менее важных факторов — описывать их влияние с помощью токов утечки, паразитных элементов в моделях электрических (нейронных) цепей первого типа, учитывающих более значимые процессы.

Сущность психических заболеваний

Предложенная интерпретация позволяет связать психические заболевания с отклонением функционирования электрических (нейронных) цепей мозга от нормальных* режимов. Отклонения могут

* Вопрос "о нормальности" в психологии — принципиальный и одновременно очень сложный. Однако в нейропсихологии понятие "норма психической функции" введен давно [21] и является одним из важнейших. Без этого понятия невозможно обойтись и при исследовании измененных состояний сознания — интенсивно развиваемой в настоящее время области психологии (см., например, [22]).

быть вызваны множеством факторов. Проведенный анализ показал, что к основным, по-видимому, следует (условно) отнести: 1) связанные с разрушением цепей; 2) вызванные неправильными связями функционирующих цепей; 3) определяемые изменением конструктивно-технологических и электрофизических параметров цепей [12, 13], включая биохимические процессы в них (см. далее). В целом, эти и возможно другие факторы и приводят к изменениям (отклонениям от нормальных) электрических режимов функционирования цепей.

По-видимому, к психическим заболеваниям приводят наиболее существенные нарушения в функционировании цепей. В связи с этим важность факторов групп 1 и 2 является наиболее очевидной. Именно на их установление фактически и нацелен проект по коннектому человека. Однако, как мне кажется, связывать все психические заболевания только с факторами групп 1 и 2 неверно. Ситуация сложнее. Поэтому здесь более подробно рассмотрим факторы группы 3.

Вернемся к вопросу о том, что определяет индивидуальность нейронных цепей. Он был подробно рассмотрен в работах [12, 13]. В частности, было показано, что нейронные цепи характеризуются крайне сложной (фактически индивидуальной) топологией. И в принципе, у каждого человека хранящаяся информация прежде всего кодируется именно в топологии нейронной цепи (факторы групп 1 и 2). Однако на индивидуальность нейронной цепи могут влиять очень много факторов. Вот лишь некоторые из указанного в работах [12, 13] списка, а именно: новые связи между нейронами; молекулярные изменения синапсов; синтез РНК, белков, приводящих к структурным изменениям в синапсах, шипиках, дендритах, аксонах, изменениям в ядре клетки и др. В результате мы и приходим к важному свойству 2 цепей, отмеченному ранее. Таким образом, в процессе модификации или перестройки электрических (нейронных) цепей первого типа важными факторами являются изменения связей, геометрии, проводимости, диэлектрической проницаемости и т. п. (в микроэлектронике это называется конструктивно-технологическими и электрофизическими параметрами) соответствующих участков цепей, что достигается с помощью разнообразных биохимических процессов*. И здесь, по-видимому, нет или мало чего незначительного, так как фактически все основные составляющие нейронной цепи (тело клетки, аксон, дендриты, шипики, синапсы, ионные каналы и др.) являются нелинейными элементами электрической цепи. О важности факторов группы 3

* Поэтому очень важно, чтобы биохимические процессы в нейронных цепях не отклонялись от нормы (были в допустимых пределах).

свидетельствуют и многочисленные экспериментальные данные, полученные для различных психических расстройств (см., например, [3, 23]).

Следует подчеркнуть, что *индивидуальность нейронной цепи фактически и является предопределяющей материальной основой субъективности*. Поэтому психические заболевания могут быть связаны с отклонениями функционирования электрических (нейронных) цепей мозга от нормальных режимов, которые вызваны факторами не только групп 1 и 2, но и группы 3. Более того, нельзя исключать совместное влияние факторов различных групп, учитывая определенную условность отмеченного разделения на группы факторов.

Итак, главным направлением при лечении психических заболеваний должно быть восстановление нормального функционирования поврежденных вследствие отмеченных факторов электрических (нейронных) цепей мозга или иная корректировка их работы. Главный вопрос — как это сделать?

Новые возможности

Известно, что традиционные методы лечения психических заболеваний, как правило, недостаточно эффективны. Если говорить о лекарствах, химических препаратах, то их главный недостаток — неизбежность [3]. Результат — для многих серьезных психических расстройств до сих пор нет эффективных терапевтических методов лечения. В то же время опытные нейрохирурги не стремятся вмешиваться в различные структуры мозга без серьезных показаний к этому ввиду возможности непредсказуемых побочных эффектов, нередко катастрофических.

Об оборудовании. В настоящее время используется широкий спектр экспериментальных методов и различных средств исследования мозга [3, 12, 13, 24]: компьютерная томография; позитронно-эмиссионная томография; магнитно-резонансная томография (МРТ); функциональная МРТ; транскраниальное электромагнитное сканирование; электроэнцефалография; электрокортикография; магнитоэнцефалография; электрическое раздражение мозга (ЭРМ) с помощью микроэлектродной техники; глубокая стимуляция мозга (ГСМ); химические препараты и лекарства; исследования, основанные на разрушениях и патологиях мозга, и др. Каждый из методов и средств имеет определенные достоинства и недостатки, однако, анализ показывает, что все они еще достаточно грубы по разрешению (по пространству и/или по времени), обычно носят косвенный характер или дополнительно имеют другие достаточно существенные недостатки. По крайней мере, из наиболее часто применяемых на сегодняшний день "ни один метод не обладает необходимым пространственно-временным разре-

шением для прослеживания единичных нейронов и даже небольших групп нервных клеток, например колонок в коре" [24].

Таким образом, используемые в настоящее время инструментарии и методы лечения мозга характеризуются одним общим серьезным недостатком — грубостью.

Почему же тогда в ряде случаев достигается успех? Автор видит две основные причины. Во-первых, значимые наработки в медицине мозга, носящие главным образом эмпирический характер. И новое оборудование, несмотря на его по-прежнему относительную грубость, все же способствует более глубокому пониманию функционирования мозга. Более того, его можно и должно использовать в рамках предложенного комплексного подхода к исследованию мозга. Во-вторых, очень важное свойство мозга — пластичность [25, 26]. К счастью, оно в определенной степени сохраняется вплоть до весьма преклонного возраста [26, 27].

Остановлюсь на нескольких перспективных областях. Целесообразно прежде всего отметить интенсивно развиваемую в настоящее время область, в которой исследуются интерфейсы мозг—машина* (ИММ) (*brain—machine interface*). ИММ — система, реализующая прямую связь между мозгом и внешним устройством. Для восстановления ряда функций часто необходимо применять различные нейроимпланты. Так, для восстановления слуха используют кохлеарные импланты, а для восстановления зрения — импланты сетчатки. При этом применяют и нейрочипы, т. е. специализированные ИС. Отмечу, что кохлеарные импланты уже установлены более, чем у 200 000 человек. Имеются успехи и в восстановлении двигательных функций, способности общаться и других когнитивных функций. Особый интерес вызывает создание протезов целых областей мозга, в частности гиппокампа, с помощью специализированных кремниевых ИС. Перспективно использование и различных микроэлектромеханических систем (МЭМС) и НЭМС. Краткое описание основных достижений, новых идей (иногда фантастических, но высказанных известными учеными) в области ИММ дано в работе [3], а прогноз дальнейшего развития — в работе [28].

Другая область связана с ГСМ, т. е. электрической стимуляцией глубинных структур мозга с помощью тонких электродов диаметром около 1,5 мм. Метод является развитием (продолжением)

* Применяются и другие близкие по значению названия, например "нейрокомпьютерный интерфейс", "интерфейс мозг—компьютер". Автор считает самым подходящим по смыслу термин "интерфейс мозг—машина", так как в нем используется наиболее общий, нежели "компьютер", и более верный по значению термин — "машина".

ЭРМ, пионерами которого являлись В. Пенфильд, Х. Дельгадо, Н. П. Бехтерева, и грубость его отмечалась в работах [12, 13]. У медиков вызывает крайнее удивление высокая эффективность метода ГСМ при лечении ряда очень серьезных психических расстройств [3], в частности, болезни Паркинсона, депрессии, связанных с перевозбудимостью (гиперактивностью) определенных структур мозга. Положительные результаты достигнуты и при недостаточной возбудимости областей, например при выведении пациентов из комы [3]. Успехи ГСМ во многом вызваны следующими причинами: 1) на настоящий момент определены экспериментально области мозга, ответственные за многие психические заболевания [3]; 2) с помощью ГСМ происходит восстановление нормальных режимов функционирования соответствующих электрических (нейронных) цепей мозга. Хотя нейропсихологи часто связывают болезнь Паркинсона с разрушением нейронных цепей (фактор 1), а депрессию — с неправильными связями нейронных цепей (фактор 2), нельзя исключать и фактор 3, т. е. влияние отклонений от нормы биохимических процессов в нейронных цепях. Косвенно в пользу последней гипотезы свидетельствуют экспериментальные данные о стимуляции с помощью метода ГСМ роста новых нейронов в гиппокампе [3]. Судя по всему, инициированные искусственно электрические процессы запускают каскады биохимических процессов, приводящих к росту новых нейронов, восстановлению связей между ними. В связи с этим мне кажется очень интересным исследовать влияние вариации электрических режимов стимуляции в методе ГСМ.

Учитывая интерпретацию мозга как объекта органической гибридной наноэлектроники, позволяющую по-новому взглянуть на его функционирование и кратко описанную выше, качественно новые возможности откроются в рассматриваемом вопросе при масштабном применении достижений наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий (наноуказ в целом). Стратегическими направлениями должны стать разработка новых инструментария и методов лечения. Основными задачами при этом будут: 1) исследование; 2) лечение; 3) диагностика; 4) мониторинг; 5) контроль нейронных цепей и других составляющих мозга.

Отмечу, что в указанных ранее перспективных областях, связанных с ИММ и ГСМ, магистральным направлением усовершенствований является миниатюризация. Так, уже в настоящее время изготавливают кремниевые ИС наноэлектроники с проектными нормами 14 нм. Не вызывает сомнения, что такие самые современные технологии будут использованы для создания нейрочипов (нейрокомпьютеров), повышая их потенциал в ИММ ввиду малых (приемлемых) размеров при одновре-

менном увеличении функциональных возможностей. В то же время применяемые зонды для реализации ГСМ пока достаточно грубы и могут приводить к кровотечениям, которые иногда заканчиваются инсультами [3]. Для усовершенствования подобных методов в идеале необходимо несколько условий." Во-первых, воздействие на строго определенную точку (место) нейронной цепи, а возможно и на комбинацию точек в пространстве и во времени, причем сигналом (сигналами) определенной формы (сила тока, частота и т. п.). Во-вторых, использование более совершенных электродов, например, в виде нанопроволок, так как с их помощью можно будет подключиться даже к определенной точке отдельного нейрона, т. е. к требуемому месту электрической цепи первого типа" [12, 13].

Подключать, по-видимому, можно будет не только нанопроволоки к любой локальной области нейронной цепи, но и другие наноустройства (нанотрубки, наноэлектроды, наносенсоры и др.) практически без разрушений в целях корректировки и восстановления (лечения и протезирования) работы, исследования и диагностики цепей. Перспективным для восстановления электрических связей* между нейронами является использование проволок с диаметром микрометрового и нанометрового диапазонов, а нано- и микротрубки, в принципе, можно применять не только для создания электрической связи, но и для транспорта различных химических средств, т. е. для более полноценного восстановления разрушенных связей, а также доставки медикаментов. Таким образом можно лечить, по крайней мере, некоторые болезни, вызванные факторами группы 1 и 2.

Очень интересным направлением, с которым связывают большие надежды, считается оптогенетика [3, 29]. Суть ее заключается в том, что внедрив светочувствительный ген (белок) в нейрон можно после его освещения возбудить нейронные цепи, отвечающие за определенные схемы поведения. Таким образом, допустимо будет не только устанавливать соответствующие нейронные цепи, но и управлять поведением. В настоящее время метод апробирован на мухах и крысах. Считается, что эта технология поможет в лечении таких серьезных психических расстройств, как болезнь Паркинсона, депрессия, а также улучшить метод ГСМ.

Многие из отмеченных продуктивных методов лечения мозга и некоторые диагностики, требуют вскрытия черепа, т. е. инвазивные методы, что вообще говоря, плохо. Нанoeлектроника, наноматериалы и нанотехнологии (нанонауки в целом) мо-

* И тут также будет очень важным свойство пластичности мозга. Поэтому, хотя бы иногда, будет достаточно просто восстановить электрическую связь в областях мозга и/или между ними.

гут дать импульс к интенсивному развитию малоинвазивных и неинвазивных методов, т. е. качественно новой медицине мозга.

К наномасштабу относят объекты, в которых хотя бы одно из измерений находится в диапазоне от 1 до 100 нм. Именно в этом диапазоне, как известно, находятся характеристические размеры многих основных биологических структур мозга (гены, ДНК, РНК, нейромедиаторы, белки и др.). Это имеет важное значение, так как сама Природа при создании мозга интенсивно использовала нанообъекты.

Отмечу, что в настоящее время все большее число психических расстройств связано именно с нанообъектами. Приведу лишь некоторые установленные факты [3, 23]. Так, большинство специалистов считает, что "у каждого психического расстройства своя генетическая база" [3], в частности, обнаружен общий генетический фактор пяти серьезных психических болезней, а именно: шизофрении, биполярного расстройства, аутизма, депрессии и синдрома дефицита внимания и гиперактивности. Более того, анализ ДНК показал, что четыре гена повышают риск возникновения таких расстройств, причем два отвечают за регуляцию кальциевых ионных каналов, т. е. ключевых НЭМС электроники мозга (см. ранее). Ряд психических расстройств связывают с недостаточностью (например, болезнь Паркинсона) или избыточностью (например шизофрения, синдром Туретта) тех или иных нейромедиаторов (дофамин, глутамат, серотонин, ацетилхолин и др.) [3, 23], т. е. отклонением их от нормы. Данные факты убеждают в том, что с психическими болезнями надо начать активно и целенаправленно бороться и на наноуровне.

Следовательно, основные способы возврата к нормальному режимам функционирования электрических (нейронных) цепей, отклонения от которых вызваны факторами группы 3, должны способствовать восстановлению выработки или хотя бы доставки до нормы соответствующих нанообъектов, в частности нейромедиаторов, а также транспорту лекарств, приводящих к нормализации биохимических процессов непосредственно в таких цепях. Так как доставка должна быть избирательной, дозированной, локальной, то проблемами станут средства и способы такой доставки.

О средствах доставки. Здесь опять же есть чему поучиться у Природы. Так, известно, что в везикулах (пузырьках) диаметром около 10–60 нм** [30] переносятся по аксону в синапс тысячи нейромедиаторов. Даже ДНК (с длиной около 2 м) типичной человеческой клетки в скрученном виде упа-

** В литературе приводятся отличающиеся сведения, однако типичным является диапазон от 10 до 100 нм, т. е. входящий в нанометровый диапазон.

кована в ядре с диаметром всего около 0,005 мм* [31]. Поэтому средствами доставки в мозг могут и должны стать микро- и нанообъекты, например, сферы, частицы, капсулы, цилиндры, трубки микрометрового и нанометрового характеристических размеров, содержащие необходимые материалы. Даже первые экспериментальные результаты [32—34] по доставке лекарств с помощью подобных искусственных микро- и нанообъектов при лечении различных заболеваний человека, включая рак, весьма убедительно свидетельствуют о больших возможностях данного подхода. При доставке могут быть использованы различные воздействия (магнитное, ультразвуковое, тепловое и др.), молекулярные моторы, углеродные нанотрубки (УНТ) и др., в том числе средства, которые в состоянии преодолевать гематоэнцефалический барьер** [34].

Способы доставки, по-видимому, составят еще большую проблему. Ситуация будет проще при разработке инвазивных методов. В этом случае применение найдут различные микро- и наноустройства, включающие зонды, трубки, проволоки, волокна, скальпели, лазеры и т. п. с характеристическими размерами микрометрового и нанометрового диапазонов.

Гораздо сложнее будет при разработке малоинвазивных и неинвазивных методов. Перспективным является использование различных магнитных наночастиц и нанокapsул, проводимых по структурам мозга с помощью электромагнитных устройств. Особый интерес представляют и углеродные наноматериалы [35—37]. Так, в настоящее время продемонстрирована экспериментально чувствительность УНТ к электромагнитному сигналу. Более того, проводятся интенсивные исследования по разработке нанорадио на УНТ [35, 36, 38, 39]. В связи с этим можно представить миниатюрную "подводную лодку", собранную из наночастиц, включающую нанорадио на УНТ, лекарства и нанообъекты и транспортирующую по кровеносной системе или/и нервной ткани в строго определенное место мозга, например к опухоли, и выгружающей спасительные средства по радиочастотному сигналу извне, а затем выходящую из организма (мозга)***. Не исключена возможность использования подобных "подводных лодок" для восстановления (проводки) нейронных связей с помощью микро- и нанопроволок (трубок, волокон и т. п.).

* Приводимые в литературе данные также различаются.

** Проблема, которую проще решить именно на наноразмере.

*** Впервые подобная идея была высказана автором на Российской научно-технической конференции "Гибкая электроника" (13—15 ноября 2013 г., г. Санкт-Петербург) в ответе на вопрос о возможности использования нанорадио в медицине.

Более кардинальным решением проблемы, однако, будет возврат к идее Р. Фейнмана и А. Хиббса о создании "микроскопических роботов", "крошечных механических "хирургов", "крошечных автоматов" [40] или создании ремонтных бригад из микро- и нанороботов. Учитывая высочайшую сложность мозга, практической реализацией этой прекрасной идеи придется заниматься всерьез на микро- и наноразмере.

Заключение

Проведенное краткое рассмотрение основных направлений двух глобальных программ исследования мозга BRAIN Initiative (США) и Human Brain Project (ЕС) выявил их недостатки. Кроме того, к отмеченным выше следует добавить тот факт, что в этих программах не учитывается в достаточно полной мере индивидуальность нейронных цепей. Так, в коннектоме человека проблематично учесть многочисленные факторы группы 3, которые определяют внутренние свойства цепей и могут быть важны в психических заболеваниях человека, т. е. в живом мозге. Нейрокибернетический подход на основе транзисторных моделей формален и груб, так как не учитывает многих реально протекающих в мозге процессов.

Предложенная интерпретация мозга как объекта органической гибридной нанoeлектроники позволяет надеяться на качественный прорыв в исследовании и лечении мозга с применением достижений нанонаук, в частности, нанoeлектроники, наноматериалов, нанотехнологий. В работе отмечены основные возможные пути (потенциал) их использования, т. е. перспективы различных направлений. С одной стороны, так как мозг — это объект естественной нанoeлектроники, то особую перспективу представляет протезирование не только отдельных участков, но и целых его областей и структур с помощью устройств искусственной электроники. Главным нашим союзником при этом будет сам мозг, в частности его пластичность. А с другой стороны, Природа на примере мозга показывает нам магистральный путь развития искусственной электроники после закона Мура.

В целом, до тех пор пока не будет создана общепризнанная и верная теория функционирования мозга, вряд ли какая-нибудь одна стратегия (подход) его исследования приведет к полномасштабному успеху. Хотя автор и считает предложенные интерпретацию и комплексный подход**** наиболее правильными и гибкими по сравнению с известными, включая рассмотренные, на данном

**** Предложенный комплексный подход может быть реализован относительно быстро в первом приближении, а в дальнейшем возможны модификации и уточнения. Допустима комбинация и с коннектомикой.

этапе необходимо развивать и применять разнообразные стратегии, что обязательно приведет к более глубокому пониманию функционирования мозга и, как следствие, к успеху в лечении самых различных психических заболеваний человека. Задача здесь, действительно, очень тяжелая и трудоемкая и, по-видимому, растянется на десятилетия, если не больше, однако ставки за пределами высоки. И это не только разгадка главной загадки Природы, а что более важно — полноценная жизнь многих миллионов людей, в том числе дорогих и любимых!

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность своим ученицам Н. В. Коломейцевой и И. А. Романовой за подготовку рукописи статьи к печати.

Список литературы

1. **Иванов-Муромский К. А.** Нейроэлектроника, мозг, организм. Киев: Наукова думка, 1983. 175 с.
2. **Майерс Д.** Психология. Минск: Попурри, 2006. 848 с.
3. **Kaku M.** The Future of the Mind: The Scientific Quest to Understand, Enhance, and Empower the Mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
4. **Гинзбург В. Л.** "Физический минимум" — какие проблемы физики и астрофизики представляются особенно важными и интересными в начале XXI века? // УФН. 2007. Т. 177, № 4. С. 345—346.
5. **The White House Brain Initiative.** URL: <https://www.whitehouse.gov/BRAIN>
6. **Seung S.** Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are. New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2012. 384 p.
7. **Human Brain Project.** URL: <https://www.humanbrainproject.eu>
8. **Научная сессия** Общего собрания Российской академии наук // Вестник Российской академии наук. 2010. Т. 80, № 5—6. С. 397—521.
9. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники // "Нанотехнологии — 2012". Труды Международной научно-технической конференции, г. Таганрог, Ростовская область, Россия, 25—29 июня, 2012 г. С. 17—18.
10. **Абрамов И. И.** Мозг — объект наноэлектроники // 22-я Международная Крымская конференция "СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии". Материалы конференции. Крым, Украина, 2012 г., Т. 1, С. 17—19.
11. **Abramov I. I.** The brain is a nanoelectronic object // International Conference "Micro- and Nanoelectronics — 2012". Book of Abstracts. October 1st—5th, 2012. Moscow-Zvenigorod, Russia. P. 01—10.
12. **Абрамов И. И.** Мозг как объект электроники. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 с.
13. **Abramov I. I.** Brain as an Object of Electronics. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
14. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 1. С. 52—54.
15. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 3. С. 45—53.
16. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 5. С. 45—54.
17. **Абрамов И. И.** Мозг — объект органической гибридной наноэлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 6. С. 49—53.
18. **Свааб Д.** Мы — это наш мозг: От матки до Альцгеймера. СПб.: Изд-во Ивана Лимбаха, 2014. 544 с.
19. **Батуев А. С.** Физиология высшей нервной деятельности и сенсорных систем: Учебник для вузов. СПб.: Питер, 2010. 317 с.
20. **Revonsuo A.** Consciousness. The Science of Subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group, 2010. 324 p.
21. **Хомская Е. Д.** Нейропсихология. М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 288 с.
22. **Гордеева О. В.** Измененные состояния сознания: Природа, механизмы, функции, характеристики. Хрестоматия. М.: Когито-Центр, 2012. 254 с.
23. **Джуан С.** Странности нашего мозга. М.: РИПОЛ классик, 2011. 352 с.
24. **Cognition, Brain, and Consciousness.** Introduction to Cognitive Neuroscience. Second Edition / Ed. by B. J. Baars, N. M. Gage. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 p.
25. **Рамачандран В. С.** Мозг рассказывает. Что делает нас людьми. М.: Карьера Пресс, 2012. 422 с.
26. **Дойдж Н.** Пластичность мозга. Потрясающие факты о том, как мысли способны менять структуру и функции нашего мозга. М.: Эксмо, 2010. 544 с.
27. **Крайт Г., Бокум Д.** Психология развития. СПб.: Питер, 2004. 940 с.
28. **Roadmap.** The future in brain/neural-computer interaction: HORIZON—2020. URL: bnci-horizon-2020.eu/roadmap
29. **Хорост М.** Всемирный разум. М.: Эксмо, 2011. 288 с.
30. **Хомутов А. Е., Кульба С. Н.** Анатомия центральной нервной системы: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 315 с.
31. **Уиллет Э.** Генетика без тайн. М.: Эксмо, 2008. 224 с.
32. **Наноматериалы.** Нанотехнологии. Наносистемная техника. Мировые достижения за 2005 год / Сб. под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2006. 152 с.
33. **Нанотехнологии.** Наноматериалы. Наносистемная техника. Мировые достижения — 2008 год / Сб. под ред. П. П. Мальцева. М.: Техносфера, 2008. 432 с.
34. **Biomedical Nanostructures** / Ed. by K. E. Gonsalves, C. R. Halberstadt, C. T. Laurencin, L. S. Nair. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 516 p.
35. **Быстров Р. П., Гуляев Ю. В., Никитов С. А., Соколов А. В.** Микро- и наноэлектроника применительно к системам радиолокации и радиосвязи // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 9. С. 11—50.
36. **Дьячков П. Н.** Электронные свойства и применение нанотрубок. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. 488 с.
37. **Ferrari A. S., Bonaceorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S., et al.** Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems // Nanoscale. 2015. Vol. 7. P. 4598—4810.
38. **Абрамов И. И., Лабунов В. А.** Проблемы и перспективы разработки нанорадио на углеродных нанотрубках // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы 21-й Международной Крымской конференции, Севастополь, Украина, 12—16 сентября, 2011, Т. 1. С. 28—30.
39. **Barkaline V. Abramov I., Belogurov E., Chashynski A., Labunov V., Pletezhov A., Shukevich Y.** Simulation of carbon nanotubes and resonant excitation of their mechanical vibrations by electromagnetic field for nanoradio applications // Nonlinear Phenomena in Complex Systems. 2012. Vol. 15, N. 1. P. 23—42.
40. **Фейнман Р.** Визу полным-полно места: приглашение в новый мир // Химия и жизнь — XXI век. 2002. № 12. С. 20—26.

I. I. Abramov. Dr. Sci., Professor,

Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus,

nanodev@bsuir.edu.by

Prospects of Nanoelectronics, Nanomaterials and Nanotechnologies in Research and Medicine of the Human Brain

The author presents the prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain within the proposed full electronic interpretation of its functioning, and analyses the US and EU main projects concerning the human brain — BRAIN Initiative and Human Brain Project.

He points out the drawbacks of the two main research directions of those projects based on a human connectome and neurocybernetic approach with the use of the transistor models. He demonstrates that the proposed full electronic interpretation of human brain functioning and the combined hierarchical approach of its detailed analysis, based on multilevel simulation in conjunction with the experimental methods, are more flexible in comparison with the indicated approaches. In particular, the combined approach allows us to take into account various additional processes, secondary to the main ones. Thus, the developed approach is open for modifications. As a result, it is more suitable for research and medicine of the human brain.

Keywords: nanoelectronics; nanomaterials; nanotechnologies; human brain; full electronic interpretation; combined hierarchical approach; human connectome; neurocybernetic approach

I dedicate this article to the blessed memory of my mother — Galina Kazimirovna Ganysh (Adutskevich), former juvenile prisoner of the Nazi concentration camps of Osventsim, Buchenwald and Bergen-Belzen.

Introduction

The complexity of the human brain makes it a fantastic object. The number of the nervous cells is $10^{10} \dots 10^{12}$, of synapses — $10^{14} \dots 10^{15}$, and even greater is the number of the ionic channels and molecules (the key structures) about 10^{22} per 1 cm^3 . Very impressive is the brain's memory volume used for information storing. There are different estimations: $10^{15} \dots 10^{16}$ bits [1]; $10^9 \dots 10^{12}$ bits [2]. An even more impressive estimation of the total information volume by the number of possible neural states is presented in the work [3]: 2^{NK} , where N — is the full number of neurons ($N = 10^{11}$), K — is the number of generations of actuation ($K \gg 1$), it is really an astronomical figure.

Especially result of functioning of this information system is consciousness* — the main riddle of Nature. It was not without reason that Vitaly Ginzburg, Nobel Prize Winner, believed that "explanation of the origin of life and thinking on the basis of physics alone was one of the three great problems of the modern physics" [4].

The aim of the article is analysis of the prospects of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies in research and medicine of the human brain, and also of the main US and EU programs** for its studying BRAIN Initiative and Human Brain Project. The methodological basis for this is the proposed by the author full electronic interpretation of the brain functioning and a complex hierarchical approach based on multilevel modelling in combination with the experimental methods.

* Here it is obvious that the dialectic law on transition of quantity into quality is true.

** The author uses a more true translation into Russian — the word "program".

US and EU programs for brain studying

Approximately in 2013 two grandiose by their scale and ambitious by their aims human brain research programs of the USA and EU countries were announced.

BRAIN (*Brain Research through Advancing Innovative Neurotechnologies*) Initiative was announced by the US president in April, 2013 [5] with the volume of financing up to 3 billion dollars from the federal budget. The initiative was dubbed as one of the Great Challenges. It was expected to be more large-scale and complex than the *Human Genome Project*. One of its basic directions will be mapping of all the neurons of the human brain (development of a human connectome). The brain connectome was expected, at first, to help look into many mental diseases (disease of Alzheimer and Parkinson, schizophrenia, dementia, etc.), and subsequently to treat them. The forerunner of this initiative was *Human Connectome Project* of the National Health Institute of the USA [6]. Mapping was begun from the nervous system of a worm (*C. elegans*), containing only 7 thousand bonds. I would like to point out that the human connectome is approximately 100 billion times bigger. For more details concerning the connectome see the book by Professor S. Seung [6].

Human Brain Project (HBP) was announced by the European Commission practically simultaneously with the Initiative of the USA, the volume of financing of which was about 1.2 billion euros. According to the program, understanding of the human brain is one of the greatest challenges for the science of the 21st century [7]. HBP includes 13 subprogrammes. One of the basic directions will be development of a model of a human brain on transistors with the use of supercomputers. This actually is a neurocybernetic approach.

In general, the above approaches are a kind of movement to each other and continuation of the previously implemented projects, namely [3]: Human

Connectome Project, Blue Brain, IBM projects, Allen Human Brain Atlas, etc.

In the given section I will enumerate only the most essential drawbacks of the basic approaches of the above programmes, which are noted, as a rule, by the heads or participants of the projects (see, for example, [3, 6]).

About the connectome. To my mind, among the basic drawbacks of the main approaches* are the following:

1. Very long period of time necessary for obtaining of the connectome. Thus, obtaining of a single finished connectome of a worm required a decade.

2. So far a connectome can be found only from a dead brain.

3. According to Professor Seung, full quantity of information in the human connectome is about 10^{20} bytes. And, generally speaking, we do not know what to do with it. As a result Professor Seung lost hope in finishing the project, not only because of the problems with obtaining of the information, but also because of the problems with its processing (the problem with decoding of the connectome). He also had his doubts concerning the very theory of the connectome, the main principle of which was [6]: "The function of a neuron is determined mainly by its bonds with the other neurons". As it is apparent from below, those doubts were not unreasonable.

About the neurocybernetic approach. In my opinion, the basic drawbacks of the approach are the following: 1) The bonds are modelled only between the cortex and thalamus, i.e. most part of the brain is not considered; it is not clear, if this modelling reflects the reality; 2) There are no supercomputers of the demanded productivity, therefore the approach is realised stage by stage, beginning from modelling of the brain of more primitive animals, mice, in particular.

So, the common drawbacks of both basic approaches are the following: 1) Very long period of time for obtaining of information concerning the human brain; 2) Huge volumes of the expected information, understanding of which would require, apparently, correspondingly long periods of time. What does that mean?

A good review of the most important research works of the brain implemented in Russia was given at the scientific session of the General Meeting of the Russian Academy of Sciences "Brain: the Fundamental and Applied Problems" [8]. Although "The Program of the Fundamental Scientific Researches of the State Academies of Sciences for the period of 2013–2020" devoted considerable attention to the problem, it did not result in creation of such a global program for the brain research in comparison with the ones mentioned above.

Full electronic interpretation of the brain functioning

The reports of the international conferences [9–11], monographs [12, 13] and a number of articles [14–17] describe a complex hierarchical approach to the re-

* It is impossible to analyse all the projects of the programs, because a very big number of experts from the West, including the leaders in various areas of neuroscience, take part in them. And that means that breakthrough results can be obtained in other directions.

search of the human brain, based on multilevel modelling in combination with the experimental methods, within the framework of a full electronic interpretation of its functioning. Since they are described in detail in [12, 13], here I will point out only the basic moments, which will be important for the article.

The main problem with studying of the brain functioning, especially of the mental functions at the neurophysiological level, is connected with the fact that it is a tangle of a big number of physical and chemical processes. In this connection **hypothesis number one** is accepted: *according to it, the dominating influence on the brain functioning was rendered by the electric processes.* Thus, information processing in a brain takes place basically at the level of the electric processes. Other kinds of essentially important processes, i.e. the chemical processes, ensure, first of all, support for the neuron chains (electric circuits) of a brain, and also their modification.

For the first time it is demonstrated, that a neuron chain of a brain can be interpreted as a nonlinear electric circuit of the first type, having the following properties: 1) At first, the neuron chain is a growing and later a modified electric circuit (the basic difference from the integrated circuits (IC) — the electric circuit of the second type); 2) The nonlinear electric circuit of the first type is characterized by an extremely difficult topology and a variation of the properties comprising, as it would seem, the same elements (bodies of cells, axons, dendrites, spinules, synapsis, etc.); 3) Electric circuits of the first type can demonstrate a big variety of behavior, depending on both the incoming signals, and on the signals passing through them; 4) From the point of view of electronics, the brain of an adult person is a set of nonlinear electric circuits (neuron chains) of two kinds: which cannot be modified and which can be modified.

Since the key elements in the electric circuits (neuron chains) of a brain are ionic channels — complex nanoelectromechanical systems (NEMS), the brain as a whole was interpreted not as just an object of electronics, but as an object of organic hybrid nanoelectronics [12, 13]. I should point out the basic difference from IC of the solid-state micro- and nanoelectronics. In them the active elements are diodes and transistors. Thus, Nature opted for another, very different road.

Within the framework of the proposed full electronic interpretation of the brain functioning, the brain's functioning is roughly considered. Three types of the mode of its work as a set of nonlinear electric circuits were singled out, namely: 1) under an external influence; 2) without an external influence (internal); 3) mixed. All the separate operation modes of a brain, including perception, memory, thinking and other mental functions, belong to one of the specified types. Moreover, any specific operation mode of a brain is a result of passage of the electric signals via the corresponding set of the electric circuits, at that, the basic possible operations are: comparison, coding, decoding, action command, modification of the neuron chains.

Thus, a thought is decoding (internal reproduction) of the electric signals, initiated by the brain itself and passing via various neuron chains of the brain of the cor-

responding space-time configuration. Hence, a thought is a kind of a reverse process to processing of the incoming information (direct process), initiated, apparently, mainly by the brain cortex, i.e. the currents pass via the neuron chains, while images, concepts, etc. appear as a result of decoding of the information containing in the corresponding neuron chains.

Let us make some additions and specifications to the theory [12, 13] briefly described above.

The modern experimental data [3] suggest a conclusion that the sphere, responsible for realization is the prefrontal brain cortex of the frontal lobe*. Thus, initiation and possible tracking of the thinking activity takes place in the neuron chains of this sphere, and then flexible binding happens with the neuron chains of various structures and spheres of the brain, depending on the character of the thought. If, as a result, any action happens, for its comprehension it will be necessary, that the information would come for processing to the prefrontal brain cortex. As a result, a natural delay occurs, the fact which caused a very rough discussion in the neurophysiological literature (the known experiment of B. Libet of 1985 "about a free will" [3]). It turns out, that, at first, we operate, and then we realise it. In the light of the stated above this frequently occurring delay becomes clear. In the long run, nevertheless, it is the brain that takes a decision, not someone from the other world. In this connection, from my point of view; a sharp contraposition of the conscious and subconscious activities of a brain is incorrect. The basic difference is that in case of a comprehension of that or other activity an obligatory participation of the neuron chains of one more area — prefrontal brain cortex is necessary. At the same time, it is known, that the overwhelming number of human actions are carried out at a subconscious level and only an insignificant part — at the conscious level. In the latter case the quality of activity can be essentially improved. However, payment for this is the above-mentioned delay owing to the necessity of participation in the information processing of, at least, one more area of the brain, responsible for comprehension. In some cases this is not necessary, or can even be harmful, therefore, many human actions occur in an automatic mode (at the subconscious level).

Of great interest is the problem of connectivity [3] between the neuron chains of various areas of a brain in the course of its functioning. Flexibility of binding is reached, at least, at three levels: 1) Bonds between the areas and/or structures; 2) Neural ensembles (various neural ensembles can participate in the areas and structures); 3) Neurons (the neurons themselves are multifunctional). This complicates greatly the analysis. In the light of the proposed full electronic interpretation, very convincing (due to the enormous number of neurons) is the developed theory about synchronisation of the fluctuations in the neuron chains of various sec-

* One should not forget that "for normal functioning of consciousness" of crucial importance are "cerebral cortex of big hemispheres, thalamus and functional bonds between these areas of the brain" [18]. This underlines special importance of a system principle in the work of a brain [19].

tions of a brain [3]. Apparently, for the first time this idea was expressed already by A. Ukhtomsky and developed by F. Krik and K. Kokh, V. Singer and D. Edelman, and others. It was established that for the conscious activity gamma-waves with frequency of about 40 Hz were important. Earlier [12, 13] it was already noted, that "the cogitative activity, apparently, was the essence of the macroscopical collective phenomena in the nonlinear electric chains of the first type" and had a kind of a resonant character. These views do not contradict the theory about synchronisation of fluctuations.

According to A. Revonsuo [20] the theory [12, 13] can be classified as a monistic materialistic theory of consciousness of the emergent type. As it was mentioned, it contains specific processes of a higher level — macroscopical collective phenomena in the nonlinear electric circuits (neural chains) of a brain.

Complex approach to the brain research

The proposed full electronic interpretation of the brain functioning served as a basis for a complex hierarchical approach to its research, based on multilevel modelling in combination with the experimental methods [12, 13].

Development of the approach required introduction of two more hypotheses [12, 13]. So, arguments appeared that, on the one hand, the mental functions of a brain could not be described precisely by means of the quantum mechanics, and on the other hand, — *in principle the brain functioning could be described with a high (sufficient) degree of accuracy with application of the formalism of the quantum mechanics at the modern level of its development*. The latter statement is **hypothesis 2** about the sufficiency of the quantum mechanics. Also there were arguments in favour of **hypothesis 3**: *a strict mathematical description of a brain operation by means of the quantum mechanics belongs to the hard-to-solve problems of NP class*. Thus, strict modelling of a brain at the level of the quantum mechanics is impossible now and in the foreseeable future. A rational solution in the existing situation is a complex hierarchical approach on the basis of the multilevel brain modelling in combination with the experimental methods. One of the possible ways of realisation of such an approach is described in [12, 13].

An important advantage of the approach is a possibility of taking into account various "chemical, thermal and other significant processes" and influences [12, 13], i.e. their property of openness. In particular, it is possible to take into account the influence of the glia cells, which 10 times outnumber the neurons; the bulk currents [20]; possible modifications in the neuron chains, in particular, not long ago it was established that memories (the internal mode of the brain operation in accordance with the proposed interpretation) can change the structure of protein [3], etc. This will require development of the corresponding models. Even the above mentioned factors involve a lot of uncertainties. However, rather simple ways of taking into account of the less important factors are possible — their influence can be described by means of the leakage current, parasitic elements in the models of electric circuits (neural chains) of the first type, taking into account more significant processes.

Essence of mental diseases

The proposed interpretation allows us to connect the mental diseases with a deviation of functioning of the electric (neural) chains of a brain from the normal* modes. The deviations can be caused by numerous factors. Analysis demonstrated that, apparently, we can conditionally refer to them the following: 1) The factors connected with destruction of chains; 2) The factors caused by wrong bonds of the functioning chains; 3) The factors determined by the changes in the design-technological and electrophysical parameters of the chains [12, 13], including the biochemical processes in them. As a whole, these and other factors lead to changes (deviations from norms) in the electric modes of the chains' functioning.

Apparently, mental diseases result from the most essential problems in functioning of the chains. In this connection the importance of the factors of groups 1 and 2 is the most obvious. They are exactly the aim of the human connectome project. However, it would be incorrect to connect all the mental diseases only with the factors of groups 1 and 2. The situation is more complex. We will consider factors of group 3 in more detail.

Let us return to the question, what determines individuality of the neuron chains. This is considered in detail in [12, 13]. In particular, it is shown, that the neuron chains are characterized by extremely complex (actually, individual) topology. In principle, in each person the stored information is coded exactly in the topology of a neuron chain (factors of groups 1 and 2). However, individuality of a neuron chain can be influenced by many factors. Here are only some of the list containing in [12, 13], namely: new bonds between the neurons; molecular changes of synapses; synthesis of RNA, proteins leading to the structural changes in synapses, spinules, dendrites, axons, changes in the nuclei of cells, etc. As a result we come to an important property of the 2 chains mentioned above. During the process of modification or reorganisation of the electric circuits (neural chains) of the first type, the important factors are the changes in the bonds, geometry, conductivity, dielectric permeability, etc. (in microelectronics they are called design-technological and electrophysical parameters) of the corresponding sites of the chains, which is reached by means of the biochemical processes**. Here, apparently, actually all the basic components of a neuron chain (cell body, axon, synapses, spinules, dendrites, ionic channels, etc.) are nonlinear elements of an electric circuit. Numerous experimental data testify to the importance of the factors of group 3 for various mental disorders (for example, [3, 23]).

* The question "of normality" in psychology is a matter of principle and at the same time it is very difficult. However, in neuropsychology the concept of "a norm of a mental function" was introduced long time ago [21] and is one of the most important ones. Without this concept it is impossible to implement the research of the changed states of consciousness — an intensively developing area of psychology (see, for example, [22]).

** Therefore it is very important, that the biochemical processes in the neuron chains do not deviate from the norms and remain within the admissible limits.

It is necessary to underline, that *individuality of a neuron chain actually is a predetermining material basis of subjectivity*. Therefore, the mental diseases can be connected with deviations of functioning of the electric circuits (neural chains) of a brain from the normal modes, which are caused by the factors of not only groups 1 and 2, but also of group 3. We cannot exclude a joint influence of the factors of various groups, considering a certain conditional character of the noted division into the groups of factors.

So, restoration of normal functioning of the damaged electric circuits (neural chains) of a brain or other correction of their operation should be the mainstream in treatment of the mental diseases. The main question is as how to do this?

New opportunities

As is known, the traditional methods of treatment of mental diseases, as a rule, are insufficiently effective. If we talk about medicines and chemical preparations, their main drawback is that they are nonselective [3]. The result is that for many serious mental disorders there are still no effective therapeutic methods of treatment. At the same time, experienced neurosurgeons do not interfere in different brain structures without substantial reasons because of unpredictable and often catastrophic side effects.

Equipment. For brain research a wide spectrum of experimental methods are used [3, 12, 13, 24]: computer and positron-emission tomography, magnetic resonance tomography (MRT), functional MRT, transcranial electromagnetic scanning, electroencephalography, electrocorticography, magnetoencephalography, electric irritation of a brain (EIB) by means of microelectrode technologies, deep stimulation of a brain (DSB), chemical preparations and medicines, researches based on brain destructions and pathologies, etc. Each method has certain advantages and drawbacks, however analysis shows, that all of them are rather rough by their resolution (in space and/or time), usually have indirect character or in addition have other essential drawbacks. In any case, "none of the frequently applied methods has the necessary space and/or time resolution for tracing of single neurons and even groups of neuron cells, for example, columns in brain cortex" [24].

Thus, used the applied instruments and methods of brain treatment are characterized by one common and serious drawback — roughness.

Then, why a success is reached in some cases? The author sees two principal reasons for that. Firstly, significant success in the brain medicine has mainly an empirical character. New equipment, despite its relative roughness, nevertheless, promotes deeper understanding of a brain functioning. It can and should be used within the framework of the proposed complex research approach. Secondly, a very important property of the brain is its plasticity [25, 26]. Fortunately, to a certain degree it remains up to a rather old age [26, 27].

I will dwell upon the perspective areas. It would be appropriate to mention the intensively growing area,

using the brain-machine interface* (BMI). BMI is the system realizing a direct communication between a brain and an external device. For restoration of some functions it is often necessary to apply various neuroimplants. So, for restoration of hearing the cochlear implants are used, and for sight restoration — the retina implants. Neurochips, i.e. special IC, are also applied. The cochlear implants are already installed in more than 200 000 persons. There is success also with restoration of the movement functions, abilities to communicate and others cognitive functions. Of special interest is development of artificial limbs for the whole areas of a brain, of hippocampus, in particular, by means of special silicon IC. Use of microelectromechanical systems (MEMS) and NEMS is also promising. A brief description of the basic achievements, new ideas (sometimes fantastic, but announced by well-known scientists) in the field of BMI is given in [3], and the development forecast — in [28].

Another area is connected with DSB, i.e. electric stimulation of deep brain structures by means of thin electrodes with diameter of about 1.5 mm. The method is development of EIB, pioneered by V. Penfield, H. Delgado and N. Bekhtereva. Its roughness was marked in [12, 13]. Physicians are very surprised with high efficiency of DSB method in treatment of some very serious mental disorders [3]; in particular, Parkinson's disease, depressions caused by overexcitation (hyperactivity) of certain brain structures. Positive results were reached also in case of insufficient excitability of the areas, for example: when patients were withdrawn from a coma [3]. To a great degree the success of DSB is due to the following reasons: 1) the areas of the brain responsible for many mental diseases [3] were determined experimentally; 2) by means of DSB a restoration of the normal modes of functioning of the corresponding electric circuits (neural chains) of the brain takes place. Although neuropsychologists often connect Parkinson's disease with destruction of the neuron chains (factor 1), and depression — with the wrong bonds of the neuron chains (factor 2), factor 3 should not be excluded, i.e. the influence of the deviations from the norms of the biochemical processes in the neuron chains. The latter hypothesis is indirectly supported by the experimental data on stimulation by means of the DSB method of the growth of new neurons in hippocampus [3]. Apparently, the artificially initiated electric processes provoke cascades of the biochemical processes leading to the growth of new neurons, and restoration of the bonds between them. In this connection, it is very interesting to investigate the influence of the variation of electric modes of stimulation in the DSB method.

Taking into account the interpretation of a brain as an object of organic hybrid nanoelectronics, allowing a new vision of its functioning and described briefly above, qualitatively new opportunities are open in the discussed ques-

tion in case of large-scale application of the achievements of nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies (nanosciences in general). The strategic directions should be development of new instruments and methods of treatment. The primary goals will be: 1) research; 2) treatment; 3) diagnostics; 4) monitoring; 5) control of the neuron chains and other brain components.

In the above perspective areas connected with BMI and DSB, the main direction is miniaturization. So, silicon IC nanoelectronics with design norms of 14 nm are already produced. No doubt, that such advanced technologies will be used for creation of neurochips (neurocomputers), raising their potential in BMI due to their small (acceptable) sizes with a simultaneous increase of their functionalities. The presently applied probes for realisation of DSB are rather rough and can lead to bleedings, sometimes ending with strokes [3]. Ideally, for improvement of the methods certain conditions should be met. "Firstly, influence should be applied to a strictly certain point (spot) of the neuron chain, and, possibly to a combination of points in the space and time, at that, this should be done by the signals of a certain form (current strength, frequency, etc.). Secondly, more sophisticated electrodes are necessary, for example, in the form of nanowires, because this will make it possible to get connection even to a certain point of a separate neuron, that is, to the required spot of the electric circuit of the first type" [12, 13].

Apparently, it will be possible to connect to any local area of a neuron chain not only nanowires, but also other nanodevices (tubes, electrodes, sensors, etc.) practically without destruction, for the purpose of correction and restoration (treatment and prosthetics), research and diagnostics of the chains. For restoration of the electric bonds** between the neurons very promising is the use of wires with diameters of the micrometer and nanometer bands, while the nano- and microtubes can be applied for establishment of the electric ties and transport of various chemicals, that is, for a full restoration of the destroyed bonds and delivery of medicines. Thus, it will be possible to treat at least certain diseases, caused by factors of group 1 and 2.

Very interesting direction is optogenetics [3, 29]. Its essence is that by introduction of a light sensitive gene (protein) in a neuron, after its illumination it is possible to excite the neuron chains responsible for certain schemes of behaviour. It is possible not only to establish the corresponding neuron chains, but also to control their behaviour. The method was tested on flies and rats. This technology is believed to improve treatment of such mental disorders as Parkinson's disease, depression and also can improve the DSB method.

Many of the above productive methods of brain treatment and even some diagnostics require cephalotomy, in other words, these are the invasive methods, which is not so good. Nanoelectronics, nanomaterials and nanotechnologies (nanoscience as a whole) can give an impetus to

** Here, the property of plasticity of a brain will also be important. Therefore, sometimes it will be sufficient just to restore the electric bond in the areas of brain and/or between them.

* Other terms, close in their meaning, are also applied, for example, "neurocomputer interface", "interface-brain-computer". The author believes that the most suitable by its meaning is expression "interface-brain-machine", because the term "machine" is more general and true than "computer".

an intensive development of little-invasive and noninvasive methods, i.e. qualitatively new brain medicine.

The objects referred to a nanoscale have at least one of their dimensions in the range from 1 up to 100 nm. Exactly within this range are the typical sizes of many basic biological brain structures (genes, DNA, RNA, neuromediators, proteins, etc.). This is important, because Nature itself used nano-objects intensively for creation of the brain.

I should point out that increasingly many mental disorders are connected with nano-objects. Let me present some facts [3, 23]. Thus, most specialists believe "that each mental disorder has its genetic basis" [3], in particular, a common genetic factor of five mental illnesses was discovered, namely: schizophrenia, bipolar disorder, autism, depression, attention deficit disorder and hyperactivity. DNA analysis demonstrated, that four genes raise the risk of occurrence of such disorders, while two of them are responsible for regulation of the calcium ionic channels, i.e. key NEMS of the brain electronics. A number of mental disorders are connected with insufficiency (Parkinson disease) or redundancy (schizophrenia, Turret syndrome) of the neuromediators (dopamine, glutamate, serotonin, acetylcholine, etc.) [3, 23], i.e. their deviation from the norms. The given facts convince us that it is necessary to begin an active and purposeful struggle with the mental illnesses also at the nanolevel.

Hence, the basic ways of returning to the normal modes of functioning of the electric circuits (neural chains), the deviations from which are caused by factors of group 3, should promote restoration of generation or delivery of the corresponding nano-objects to up to the standards, in particular, this refers to the neuromediators, and also to the transport of the medicines leading to normalization of the biochemical processes in such chains. Since such delivery should be selective, dosed and local, the problems will be with the means and ways.

Means of delivery. Here, again, we should learn from Nature. Thus, vesicles (vials) with diameters of about 10–60 nm* [30] transport thousands of neuromediators via axon to synapse. Even DNA (with the length of about 2m) of a typical human cell in a twisted form is packed in a nucleus with a diameter of about 0.005 mm** [31]. Therefore, the means of delivery to the brain should be micro- and nano-objects, for example, spheres, particles, capsules, cylinders, tubes, etc. of the nanometer sizes, and containing the necessary materials. Even the first experimental results [32–34] of delivery of medicines by means of such artificial objects for treatment of various human diseases, including cancer, testify very convincingly to the big opportunities of the approach. The deliveries can involve various influences (magnetic, ultrasonic, thermal, etc.), molecular motors, carbon nanotubes (CNT), etc., including the means which can overcome the hematoencephalic barrier*** [34].

* In literature differing data are presented, however, the range from 10 up to 100 nm, i.e. within the nanometer limits, is typical.

** The presented data also differ.

*** The problem, which is easier to solve exactly at the nanolevel.

Apparently, the ways of delivery will present even a bigger problem. The situation will be easier during development of the invasive methods. In this case there will be applications for various micro- and nanodevices, including probes, tubes, wires, fibers, scalpels, lasers, etc. with the sizes typical for the micrometer and nanometer ranges.

There will be much more problems with development of little-invasive and noninvasive methods. Very promising is the use of various magnetic nanoparticles and nanocases, applied to the brain structures by means of electromagnetic devices. Of special interest are also carbon nanomaterials [35–37]. Thus, sensitivity of CNT to an electromagnetic signal was demonstrated experimentally. Intensive research works for development of nanoradio on CNT [35, 36, 38, 39] are going on. In this connection it is possible to imagine a tiny "submarine" of nanoparticles, including nanoradio on CNT, medicines and nano-objects, which transport via the blood system or/and the nervous tissue to strictly certain sections of a brain, for example to a tumour, and unloading wonder-working remedies by a radio-frequency signal from the outside, and then leaving the organism (brain). A possibility of use of such "submarines" for restoration (establishment) of neuronic bonds with the help of micro- and nanowires (tubes, fibers, etc.) is not excluded.

However, a more cardinal solution to the problem would be a return to the idea of R. Feynman and A. Hibbs about development of "microscopic robots", "mechanical surgeons", "tiny automatic machines" [40] or repair brigades of micro- and nanorobots. Considering the extreme complexity of the brain, the practical realisation of this idea will involve a serious approach at micro- and nanolevels.

Conclusion

A brief consideration of the basic directions of the two global brain research programs — BRAIN Initiative (USA) and Human Brain Project (EU), revealed their drawbacks. To the considerations mentioned above it is necessary to add the fact, that they do not fully take into account individuality of the neuronic chains. Thus, it is very difficult in the human connectome to take into account numerous factors of group 3, which determine the internal properties of the chains and can play an important role in human mental diseases, i.e. in a live brain. The neurocybernetic approach based on the transistor models is formal and rough, because it does not take into consideration many processes really going on in a brain.

The proposed interpretation of the brain as an object of organic hybrid nanoelectronics allows us to hope for a qualitative breakthrough in the research and treatment of the brain with the use of achievements of nanoscience, nanoelectronics, nanomaterials, nanotechnologies, in particular. The main ways (potentials) of their use, that is, development prospects were outlined. On the one side, the brain is a natural object of nanoelectronics, and of special interest is prosthetics of its certain sections and whole areas and structures with the help of artificial electronics. Our main ally will be the brain itself, and its plas-

ticity, in particular. On the other side, on the example of the brain Nature indicates the major way for development of artificial electronics after Moor's law.

In general, before we have a universally recognized and true theory of the brain functioning, any one strategy for its research will hardly lead to a full-scale success. Although the author believes that the proposed interpretation and a complex approach* are more correct and flexible in comparison with the existing ones, including the one considered above, it is necessary to develop and apply various strategies, which will inevitably lead to a deeper understanding of functioning of a brain and, as a consequence, to success in treatment of human mental diseases. The task, is really formidable and labour-consuming and apparently, will require decades, if not more, however, the rates are extremely high. This will not only be a solution to the main riddle of Nature, but, what is even more important, it will mean a high-grade life for many millions of people, including the ones we love and care about!

The author considers as his pleasant duty to express his sincere gratitude to his disciples H. V. Kolomejtseva and I. A. Romanova for preparation of the manuscript of the article for publishing.

References

1. **Ivanov-Muromskij K. A.** *Neirojelektronika, mozg, organizm*. Kiev: Naukova dumka, 1983. 175 p.
2. **Myers D. G.** *Psychology*, 5-th ed. N. Y.: Worth Publishers, 1998.
3. **Kaku M.** *The Future of the Mind: The Scientific Quest to Understand, Enhance, and Empower the Mind*. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.
4. **Ginzburg V. L.** "Fizicheskij minimum" — kakie problemy fiziki i astrofiziki predstavljajutsja osobenno vazhnymi i interesnymi v nachale XXI veka?. *Uspehi fizicheskikh nauk*, 2007, vol. 177, no. 4, pp. 345–346.
5. **The White House Brain Initiative**. URL: <https://www.whitehouse.gov/BRAIN>
6. **Seung S.** *Connectome: How the Brain's Wiring Makes Us Who We Are*. New York: Houghton Mifflin Harcourt, 2012. 384 p.
7. **Human Brain Project**. URL: <https://www.humanbrain-project.eu>
8. **Nauchnaja sessija Obshhego sobranija Rossijskoj akademii nauk, Vestnik Rossijskoj akademii nauk**, 2010, vol. 80, no. 5–6, pp. 397–521.
9. **Abramov I. I.** *Mozg – obekt organicheskoj gibridnoj nanojelektroniki, "Nanotehnologii – 2012". Trudy Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoj konferencii, g. Taganrog, Rostovskaja oblast, Russia*, 2012 t., P. 17–18.
10. **Abramov I. I.** The human brain is an object of nanoelectronics, *22nd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology", September 10–14, Sevastopol: Weber Publishing*, 2012, vol. 1, P. 17–19.
11. **Abramov I. I.** The brain is a nanoelectronic object, *International Conference "Micro- and Nanoelectronics – 2012". Book of Abstracts, October 1–5, 2012*. Moscow–Zvenigorod, Russia, pp. 01–10.
12. **Abramov I. I.** *Brain as an Object of Electronics*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 80 p. (In Russian).

* The proposed complex approach can be realized rather quickly as the first approximation, and subsequently certain modifications and amendments are possible. A combination with connectomics is admissible.

13. **Abramov I. I.** *Brain as an Object of Electronics*. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. 76 p.
14. **Abramov I. I.** The brain is an object of organic hybrid nano-electronics, or another point of view. Part I. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 1, pp. 52–54.
15. **Abramov I. I.** The brain is an object of organic hybrid nano-electronics, or another point of view. Part II. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 3, pp. 45–53.
16. **Abramov I. I.** The brain is an object of organic hybrid nano-electronics, or another point of view. Part III. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 5, pp. 45–54.
17. **Abramov I. I.** The brain is an object of organic hybrid nano-electronics, or another point of view. Part IV. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika*, 2013, no. 6, pp. 49–53.
18. **Swaab D. F.** *Wij zijn ons brein. Van haarmoeder tot Alzheimer*. Amsterdam, Antwerpen: Uitgeverij Atlas Contact, 2012.
19. **Batuev A. S.** *Fiziologija vysshej nervnoj dejatel'nosti i senzornykh sistem*. uchebnik dlja vuzov, SPb.: Piter, 2010. 317 p.
20. **Revonsuo A.** *Consciousness. The Science of Subjectivity*. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group, 2010. 324 p.
21. **Homskaja E. D.** *Nejropsihologija*. Moscow, Izd-vo Mosk. universiteta, 1987. 288 p.
22. **Gordeeva O. V.** *Izmenennye sostojanija soznaniya: Priroda, mehanizmy, funktsii, karakteristiki: Hrestomatija*. Moscow, Kogito-Center, 2012. 254 p.
23. **Juan S.** *The Odd Brain. Mysteries of Our Weird Wonderful Brains Explained*, Sydney, HarperCollins Australia Publishers, 1998.
24. **Cognition, Brain, and Consciousness**. Introduction to Cognitive Neuroscience. Second edition, ed. by B. J. Baars, N. M. Gage, Amsterdam, Elsevier, 2010. 658 p.
25. **Ramachandran V. S.** *The Tell – tale Brain. A Neuroscientist's Quest for What Makes Us Human*. New York, W. W. Norton & Company, 2011.
26. **Doide N.** *The Brain That Changes Itself: Stories of Personal Triumph from the Frontiers of Brain Science*. New York, Viking Press, 2007.
27. **Craig G. J., Baucum D.** *Human Development. Ninth Edition. Upper Saddle River*. N. J.: Prentice Hall, 2001.
28. **Roadmap** "The future in brain/neural-computer interaction: HORIZON 2020". URL: bnci-horizon-2020.eu/roadmap
29. **Chorost M.** *World Wide Mind. The Coming Integration of Humanity, Machines, and the Internet*. New York: Free Press, 2011.
30. **Homutov A. E., Kul'ba S. N.** *Anatomija central'noj nervnoj sistemy*, ucheb. posobie, Rostov n/D: Feniks, 2007. 315 p.
31. **Willet E.** *Genetics Demystified. A Self-teaching Guide*, New York, McGraw-Hill Education, 2005.
32. **Nanomaterialy. Nanotehnologii. Nanosistemnaja tehnika. Miroye dostizhenija za 2005 god** / Ed. P. P. Mal'cev. Moscow, Tehnosfera, 2006. 152 p.
33. **Nanotehnologii. Nanomaterialy. Nanosistemnaja tehnika. Miroye dostizhenija – 2008 god** / Ed. P. P. Mal'cev. Moscow, Tehnosfera, 2008. 432 p.
34. **Biomedical Nanostructures**, Ed. by K. E. Gonsalves, C. R. Halberstadt, C. T. Laurencin, L. S. Nair. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2008. 516 p.
35. **Bystrov R. P., Guljaev Ju. V., Nikitov S. A., Sokolov A. V.** Mikro- i nanojelektronika primenitel'no k sistemam radiolokacii i radiosvjazi, *Uspehi sovremennoj radiojelektroniki*, 2010, no. 9, pp. 11–50.
36. **Diachkov P. N.** *Jelektronnye svojsva i primenenie nanotrubok*, Moscow, BINOM. Laboratorija znaniy, 2014. 488 p.
37. **Ferrari A. C., Bonaccorso F., Fal'ko V., Novoselov K. S.** et al. Science and technology roadmap for graphene, related two-dimensional crystals, and hybrid systems, *Nanoscale*, 2015, vol. 7, pp. 4598–4810.
38. **Abramov I. I., Lahunov V. A.** Problems and perspectives of development of nanoradio based on carbon nanotubes, *21st International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*, September 12–16, Sevastopol: Weber Publishing, 2011, vol. 1, pp. 28–30.
39. **Barkaline V., Abramov I., Belogurov E., Chashynski A., Lahunov V., Pletezhov A., Shukevich Y.** Simulation of carbon nanotubes and resonant excitation of their mechanical vibrations by electromagnetic field for nanoradio applications, *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*, 2012, vol. 15, no. 1, pp. 23–42.
40. **Feynman R.** There's plenty of room at the bottom, *Engineering and Science*, February, 1960, pp. 22–36.

Адрес редакции журнала: 107076, Москва, Стремянский пер., 4. Телефон редакции журнала (499) 269-5510. E-mail: nmst@novtex.ru
Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия.
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-18289 от 06.09.04.

Технический редактор Т. А. Шацкая. Корректор Т. В. Пчелкина

Сдано в набор 18.11.2015. Подписано в печать 23.12.2015. Формат 60×88 1/8. Заказ МС0116. Цена договорная
Оригинал-макет ООО «Авансд солишн». Отпечатано в ООО «Авансд солишн». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru