

ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ НИКОГДА НЕ ЗАМЕНИТ ПОЛНОСТЬЮ ЧЕЛОВЕКА

© 2023 г. И. И. Абрамов*

Учреждение образования “Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники”, ул. П. Бровки, 6, Минск, 220013 Республика Беларусь

*E-mail: nanodev@bsuir.edu.by

Поступила в редакцию 27.06.2022 г.

После доработки 12.07.2022 г.

Принята к публикации 12.07.2022 г.

Дан обзор работ автора, связанных с мозгом человека как объектом электроники. Рассмотрены следующие вопросы: предложенная полная электронная интерпретация функционирования мозга и комплексный иерархический подход его исследования; сознание человека; перспективы и проблемы создания сверхума; перспективы использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании мозга человека.

DOI: 10.31857/S0544126922700016, EDN: CXZVQB

1. ВВЕДЕНИЕ

Создание достаточно полной модели мозга человека – мечта создателей искусственного интеллекта. Действительно, современная наука пока не может приблизиться к пониманию эффективности мозга. И в то же время вопрос об объяснении мышления является одной из важных проблем физики [1]. В статье проанализированы основные особенности работы человеческого мозга, а также представлены подходы, способные в некотором роде представить его электронные аналоги. В частности, дан обзор работ автора и рассмотрены следующие вопросы: полная электронная интерпретация функционирования мозга; комплексный иерархический подход его исследования; сознание и квалиа человека; перспективы и проблемы создания сверхума; перспективы использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании мозга человека.

2. ПОЛНАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ

“Мозг может интерпретироваться в качестве объекта органической гибридной нанoeлектроники, созданной Природой” [2]. Данная интерпретация впервые прозвучала в ответе автора на вопрос о достижениях в области нанoeлектроники на 11-й Международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, КрыМиКо’2001, Севастополь, 10–14 сентября 2001 г.

Впоследствии в докладах автора на международных конференциях [3–5], монографиях [6, 7]

и цикле статей [8–11] описаны подробно полная электронная интерпретация функционирования мозга и комплексный иерархический подход его исследования.

Рассмотрим сначала суть предложенной полной электронной интерпретации.

Главная проблема анализа функционирования мозга на строгом уровне обусловлена тем, что его работа основана на очень “запутанном клубке” различных физико-химических процессов. Так, на работу мозга могут оказывать влияние следующие взаимосвязанные процессы: электрические, химические, механические, тепловые и др. Традиционно в нейропсихологии выделяются химические и электрические процессы, причем, предпочтение, как правило, отдается химическим. Из указанного ранее понятно, что эти процессы могут рассматриваться только в качестве доминирующих процессов. Именно с целью попытки “распутать” указанный “клубок” автором была предложена полная электронная интерпретация функционирования мозга.

В ее основе лежит гипотеза I: считается, что доминирующее влияние на функционирование мозга оказывают электрические процессы. Таким образом, предполагается, что обработки информации в мозге идет в основном на уровне электрических процессов. Химические процессы обеспечивают питание нейронных (электрических) цепей мозга и их модификацию. Таким образом, речь идет о гибридной электронике.

Было показано [6, 7, 9], что всю нейронную цепь мозга допустимо интерпретировать в качестве нелинейной электрической цепи первого типа. Са-

мый близкий аналог твердотельной электроники — интегральная схема (ИС) — электрическая цепь второго типа. В результате сравнительного анализа цепей первого и второго типов установлены наиболее важные отличия [6, 7, 9, 12]: 1) нейронная цепь первого типа реализована на органических материалах, ИС — на неорганических; 2) в цепях первого типа основной является ионная проводимость, в ИС — электронная и дырочная; 3) ключевыми активными элементами в нейронных цепях являются каналы (ионные каналы, ионные насосы и др.) — сложные наноэлектромеханические системы (НЭМС) с характеристическими размерами в нанометровом диапазоне. Следовательно, речь идет об органической гибридной наноэлектронике. В ИС основными активными элементами являются диоды и транзисторы. Необходимо отметить, что видов и разновидностей каналов существенно больше, чем диодов и транзисторов; 4) нейронная цепь характеризуется очень сложной топологией и вариацией свойств даже однотипных элементов (тела клеток, аксоны, дендриты, шипики, синапсы и др.); 5) нейронная цепь — сначала растущая, а затем, как правило, регулярно модифицируемая цепь, что достигается в результате взаимодействия электрических и химических процессов, что является важнейшим отличием и преимуществом цепей данного типа; 6) с точки зрения электроники мозг человека, если рассматривать его в качестве информационной системы, — это, прежде всего, нелинейные электрические цепи двух видов, которые не должны модифицироваться и которые могут модифицироваться.

В итоге, цепи первого типа могут демонстрировать очень большое разнообразие в поведении в зависимости как от входящих, так и от проходящих по ним сигналов, которое пока не достигнуто в ИС. Предложенная полная электронная интерпретация позволила рассмотреть, как приблизительно функционирует мозг [6–11]. В частности, выделено три типа режима работы мозга как набора электрических цепей первого типа: 1) при внешнем воздействии; 2) без внешнего воздействия (внутренний); 3) смешанный. При этом все конкретные режимы функционирования мозга: восприятие, воспоминание, мышление и другие психические функции, относятся к одному из выделенных типов. Любой специфический режим работы мозга является результатом прохождения электрического сигнала (сигналов) по соответствующему набору нейронных цепей.

Принципиально важным является вопрос об уровне интеграции M мозга человека как объекта электроники. Традиционно в микро- и наноэлектронике оценка проводится по числу активных элементов. Такими в мозге человека являются каналы (ионные каналы, ионные насосы и др.), которых гораздо больше, чем нейронов. По грубой оценке автора [13] M лежит в диапазоне 10^{19} – 10^{21} .

Согласно более современным данным книги [14] число только натриевых насосов в одном нейроне мозга человека около 10^6 , а каналов — миллионы. Поэтому по уточненной оценке $M \gg 10^{17}$. Вывод же о том, что мозг человека является не просто объектом электроники, а объектом органической гибридной наноэлектроники [6, 7] остается в силе. Потребляемая мозгом с отмеченным уровнем интеграции мощность всего около 20 Вт дополнительно свидетельствует в пользу того, что мы имеем дело именно с наноэлектроникой.

Убедительное и всестороннее нейробиологическое сравнение мозга различных животных было проведено в книге [15]. Важнейший вывод работы [15]: “Ничего особенного в человеческом мозге, повторим еще раз, нет, если не считать удивительно большого числа нейронов”.

Таким образом, принципиальное значение по мнению автора для уникальности мозга человека имеет именно уровень интеграции, который согласно приведенной выше оценке лежит в диапазоне 10^{17} – 10^{21} активных элементов, так как между числом нейронов и числом каналов пропорциональная зависимость [16]. Результатом особенностей мозга человека и является сознание.

3. КОМПЛЕКСНЫЙ ИЕРАРХИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Хотя активные элементы нелинейных электрических (нейронных) цепей мозга, т.е. каналы, функционируют в целом по цифровому принципу: открыт–закрыт, однако, характер обработки информации в мозге и природы жизни более сложный и общий — аналого-цифровой [17]. Бесспорно, это надо учитывать при исследовании мозга. Встает резонный вопрос: как анализировать устройство аналого-цифровой электроники такого фантастического уровня интеграции? Ведь известные изделия твердотельной наноэлектроники только превзошли рубеж в 10^9 активных элементов на кристалле, и, как правило, носят цифровой характер.

Кратко описанная в п. 2 полная электронная интерпретация функционирования мозга (в ее основе лежит *гипотеза 1*) послужила базой предложенного комплексного иерархического подхода его исследования. Подход основан на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами и подробно описан в работах [6, 7, 10, 12], поэтому здесь выделю только некоторые важные моменты. Для разработки подхода необходимо было принять еще две гипотезы.

Гипотеза 2: функционирование мозга может быть в принципе описано с высокой степенью точности (достаточной) с применением квантовой механики на современном уровне развития. При принятии гипотезы устанавливается та до-

статочная физико-математическая база, на которой может быть основано исследование мозга.

Проведенный анализ вопроса и аргументы приводят к необходимости принять *гипотезу 3*: строгое математическое описание работы мозга с помощью квантовой механики относится к труднорешаемым задачам класса NP. Принятие этой гипотезы означает, что даже строгое моделирование функционирования мозга на уровне квантовой механики, к сожалению, невозможно сейчас и в обозримом будущем. Необходимы приближения, причем серьезные.

Признанный подход исследования сложных систем — метод декомпозиции, т.е. исследования по частям. Этот подход, как известно, интенсивно и эффективно используется для разработки ИС второго типа твердотельной микро- и наноэлектроники, в частности, ультрабольших ИС (УБИС) с уровнем интеграции активных элементов более 10^9 . Конечно, этот уровень гораздо меньше, чем отмеченный уровень интеграции мозга, однако, имеющийся опыт разработки ИС должен быть использован.

Перспективный выход в данном случае — предложенный комплексный иерархический подход на основе многоуровневого моделирования мозга в сочетании с экспериментальными методами. Основные идеи подхода в следующем: 1). Согласно предложенной полной электронной интерпретации функционирования мозга человека допустимо рассматривать как набор нелинейных электрических цепей, а, следовательно, для его исследования могут использоваться подобные, как и для ИС, принципы многоуровневого моделирования; 2). Анализ проблемы показывает, что моделирование мозга должно быть иерархическим в целом, т.е. между уровнями (многоуровневым), и, в частности, т.е. в рамках одного уровня целесообразно применять набор или иерархию моделей. При этом необходимо применять самые различные экспериментальные методы и оборудование. Это связано со многими причинами. Наиболее важно — задание исходных данных и компенсации “потерь” в адекватности моделирования на различных уровнях; 3). Так как задача относится к труднорешаемым класса NP (*гипотеза 3*), то разбиение на уровни не может быть однозначным, и будет зависеть от принципов разбиения, например, от моделируемых функций. В работах автора [6, 7, 10] для этих целей предложено использовать разбиение на уровни организации нервной системы учебника [16], а именно: 1) ионы; 2) молекулы; 3) органы клетки; 4) клетка; 5) локальные сети (зоны); 6) проекционные сети (системы); 7) многочисленные перекрывающиеся сети (поведение животного). Было отмечено, что если отбросить тип носителей заряда (уровень 1), то число уровней равно шести, которое совпадает

с числом известных основных уровней моделирования современных ИС [6, 7].

Проведенный анализ показывает, что так как важнейшим при анализе ИС является этап схемотехнического моделирования, то по аналогии основным и при исследовании мозга может быть также схемотехническое моделирование нейронных нелинейных электрических цепей первого типа. Для этого, однако, будет необходимо разработать многочисленные электрические модели следующих элементов: ионных каналов, ионных насосов, аксонов, дендритов, шипиков, синапсов, тел клеток и др. Учет менее существенных факторов может осуществляться с помощью токов утечки, паразитных элементов в моделях электрических (нейронных) цепей первого типа, учитывающих более значимые процессы. Далее, после схемотехнического моделирования можно строить макромодель локальной цепи и переходить на следующий уровень моделирования, а именно: проекционные сети и т.д. При моделировании каналов, т.е. НЭМС, потребуется, судя по всему, использование многоуровневого моделирования с привлечением, как минимум, элементов квантовой механики, учитывая сложность этих НЭМС.

Осторожная оценка, проведенная в [6, 7, 10], показывает, что предложенный комплексный иерархический подход, по-видимому, даст положительные результаты при моделировании различных психических функций, включая, мыслительную деятельность.

Преимуществом предложенного подхода и схемы является свойство их открытости. В частности, допустимо учитывать влияние различных химических, тепловых и других значимых процессов, воздействий и факторов, например, глиальных клеток, объемных токов, возможных модификаций в нейронных цепях, которые, как оказалось, могут быть даже во внутренних режимах функционирования мозга. Допустима комбинация и с другими известными подходами, включая коннектомику.

4. СОЗНАНИЕ ЧЕЛОВЕКА

Предложенная теория сознания человека детально описана в статьях [13, 17, 18], а квалиа — в работе [17], поэтому здесь акцентируем внимание на основных моментах.

Суть теории удобно рассматривать на примере достаточно сложного режима функционирования мозга — осознанной обработки сенсорной информации. Согласно полной электронной интерпретации — это смешанный (третий тип) режим работы мозга.

Строго говоря, при анализе осознанной обработки сенсорной информации необходимо рассматривать всю систему [13, 19]: мозг—другие составляющие нервной системы—тело—окру-

жающая среда. К сожалению, детальный анализ явлений в такой системе невозможен, поэтому было проведено рассмотрение в целом на каждом из основных этапов процесса обработки информации.

Преобразования поступающей информации (сигналов) начинается сразу после попадания на рецепторы сенсорных систем человека, так как они, как правило, предназначены для принятия одного вида сигналов, а они могут быть разнообразными: механическими, оптическими, тепловыми, химическими, электрическими и другими. Следует также помнить, что расположение рецепторов в теле носит дискретный характер. Таким образом, сразу же осуществляется редуцирование и декомпозиция входящей информации, причем влияние на эти процессы оказывает не только окружающая среда, но и тело человека.

В результате поступающая информация разделяется (декомпозиция) по внешним и внутренним системам. После первичной обработки стимул, как правило, конвертируется в электрические сигналы. В дальнейшем они распространяются по нервной системе с постоянными преобразованиями из электрических в химические (например, в химических синапсах) сигналы, и наоборот, т.е. происходят регулярные изменения (трансформация). В связи с тем, что в процессе передачи информации принципиальное значение имеют различные каналы, т.е. НЭМС, то влияние оказывают и механические процессы.

После поступления разобранной информации в мозг необходима ее реконструкция в нем же. Для упрощения анализа в дальнейшем проводилось рассмотрение процессов согласно полной электронной интерпретации функционирования мозга, т.е. нейронные цепи считались электрическими цепями, по которым распространяются электрические сигналы.

С целью выделения основных закономерностей было рассмотрено несколько возможных вариантов обработки сенсорной информации. Поступившая разобранная информация об окружающей среде и теле распределяется далее таламусом (за исключением запахов) на карты соответствующих сенсорных систем. Карты – это области коры головного мозга, в которых хранится соответствующая информация в разобранном виде в результате иерархической обработки, осуществленной ранее, и частично заложенной генетически.

При обработке сенсорной информации идет иерархическая сборка информации в результате прохождения электрических сигналов по нейронным цепям соответствующих областей коры. Следовательно, из разобранной информации закодированной и заложенной ранее на хранение может быть воспроизведена в результате прохождения электрических сигналов (декодировка) как старая, так и новая информация, т.е. идет гибкая сбор-

ка поступающей информации из разнообразных фрагментов. Процесс напоминает использование пикселей в экранах телевизоров. Такая реконструированная информация распределена по картам мозга, поэтому ее надо продолжать объединять в единое целое.

Реактивация соответствующих нейронных цепей карт сенсорных систем приводит к формированию коалиции нейронов, ответственной за реконструкцию тех или иных воспоминаний и/или действительности. Далее информация от сенсорных карт поступает в лобные доли для дальнейшего объединения в единое целое. И здесь возможно большое число вариантов. Рассмотрим лишь некоторые, но характерные.

В психологии выделяется две системы мышления [20]: система 1 (автоматическая система) и система 2 (произвольная система). “Система 1 срабатывает автоматически и очень быстро, не требуя или почти не требуя усилий и не давая ощущения намеренного контроля. Система 2 выделяет внимание, необходимое для сознательных умственных усилий, в том числе для сложных вычислений. Действия системы 2 часто связаны с субъективным ощущением деятельности, выбора и концентрации... Система 1 импульсивна и интуитивна, а система 2 способна к рассуждению...” [20].

В работе автора [13] мыслительная деятельность в целом была представлена происходящей по “спирали”. Один из витков спирали работы автоматической системы 1 показан на рис. 1. Сначала следует планирование (моделирование или прогноз) ситуации, а затем – действие. Процесс может продолжаться и дальше. Работа произвольной системы 2 более разнообразна и сложна. Несколько вариантов одного витка “спирали” показаны на рис. 2. В первом варианте (рис. 2а) сначала происходит планирование (моделирование или прогноз) ситуации, затем – действие (точнее его управление мозгом), а далее – осознание. Возможен и более простой вариант работы системы 2 (рис. 2б), а именно: планирование (моделирование или прогноз) ситуации, а далее – осознание. Было отмечено, что из выделенных вариантов витков могут формироваться сложные “спирали” мыслительной деятельности. Сами же ситуации и действия могут разбиваться на составляющие (части), что еще больше усложняет рассмотрение процесса мышления.

В качестве примера был детально рассмотрен случай, когда человек идет по улице [17]. Обычно все происходит в автоматическом (на подсознательном уровне) режиме, т.е. работает система 1. Фактически сигналы, проходящие по объединенной коалиции нейронов, и есть планирование (моделирование или прогноз) ситуации (это объединение нейронов было названо коалицией планирования или прогнозирования [17]). Далее происходит инициация действия (рис. 1) и передача сигналов из

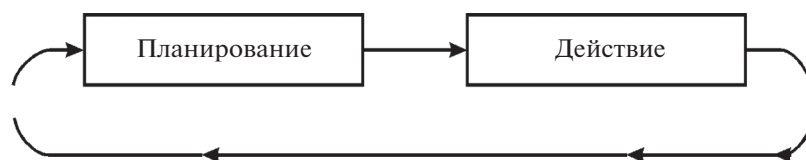


Рис. 1. Виток “спирали” автоматической системы.

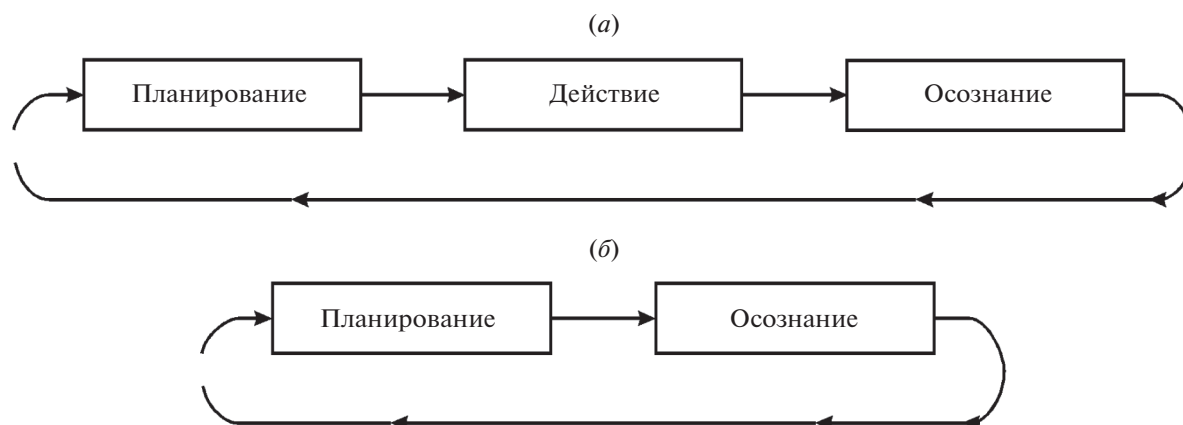


Рис. 2. Возможные варианты витка “спирали” произвольной системы: *а* – с участием “действия”, *б* – без участия “действия”.

мозга соответствующим системам для исполнения. По данным нейробиологии для осуществления таких действий требуется около 100 миллисекунд [21].

Самое интересное происходит в другом случае. Предположим, что коалиция нейронов, хотя бы одной из сенсорных систем, сигнализирует об опасности. В этой ситуации происходит повышение активации и превышение порога осознания, своеобразный резонанс с картами целей, смыслов в лобных долях. Возможно, что соответствующие области лобных долей дополнительно активируются сигналами из таламуса тем самым подготавливая их к приему сигналов от сенсорных карт. В результате такого взаимодействия начинает идти из лобных долей в сенсорные карты обратная (отраженная) волна повышенной активации. По оценкам нейробиологов задержка в волне составляет около 300–500 миллисекунд и более (см., например, [22]).

Энергетический поток, проходящий по выделенной объединенной коалиции нейронов, автор считает осознанием [13, 17]. Отмечалось [17], что так как сознание является системным свойством прежде всего мозга человека, на процесс осознания в рассматриваемом случае может влиять не только ствол, таламус и кора, но и структуры, ответственные за эмоции, речь и др. Важно также то, что коалиция нейронов осознания может не совпадать с коалицией прогнозирования, так как происходит при измененной (как правило, повышенной) акти-

вации. Это необходимо в основном для следующего: 1) выделения “главной” коалиции нейронных цепей и в результате осознания возможной корректировки действий (рис. 2*а*); 2) “отсечки”, подавления влияния второстепенных цепочек; 3) для возможной корректировки (запоминания) карт.

Для осуществления такой сознательной деятельности необходим определенный уровень активации, лежащий в оптимальном для каждого человека диапазоне. Более низкая активация характерна для некоторых измененных состояний сознания (ИСС), например, состояниях сна, некоторых психических расстройств, различных видов комы и др. [18]. В то же время превышение оптимального диапазона активации может приводить к приступам эпилепсии, другим расстройствам. Отмечалось, что кроме уровня активации (сигналов) для прохождения этой волны по коалиции нейронов осознания необходима и определенная степень синхронизации взаимодействующих нелинейных электрических цепей первого типа.

Таким образом, сделан вывод [17]: осознание человека – главный доминирующий процесс энергетической реконструкции в соответствующей коалиции нейронов в оптимальном диапазоне активации бодрствующего состояния человека. В конкретный момент времени коалиция осознания может быть только одной, что и приводит к

известному в психологии феномену “бутылочно-горлышка” (см., например, [22]).

Схематично процесс осознания в рассматриваемом случае показан на рис. 2а. Он характеризуется, как правило, повышенными энергозатратами. Исключением являются ряд ИСС, например, состояние “потока”, медитации [18].

Изложенное выше позволило выделить основные составляющие “спирали” мыслительной деятельности, когда работают система 1 или система 2 [13, 17]. В случае внутреннего режима работы системы 2 возможно исключение инициации действия, т.е. идет только чередование функционирования коалиций прогнозирования и осознания (рис. 2б).

Было рассмотрено детально несколько возможных вариантов мыслительной деятельности [13, 17, 18]. Огромное разнообразие может реализовываться вследствие обмена сигналами между различными областями мозга, выхода некоторых подсознательных процессов на уровень осознания, и наоборот. Многое зависит и от индивидуальных нейронных цепей.

И тем не менее, несмотря на большое разнообразие возможных вариантов, было установлено, что при обработке информации в центральной нервной системе общей и главной закономерностью являются преобразования сигналов и энергетические реконструкции [17].

Рассмотренный энергетический поток по соответствующим нейронным цепям, который составляет предмет нашего осознания, является основным содержанием и рабочей памяти человека. Возможные варианты дальнейшего развития событий неплохо описаны в нейробиологии (см., например, [21]). Так, для более длительного хранения информация попадает в гипокамп, который перенаправляет ее в различные области мозга и таким образом происходит регулярная корректировка сенсорных карт и карт префронтальной коры головного мозга. Важным при этом является степень новизны поступившей информации.

Связанная с сознанием проблема “квалиа” (qualia), т.е. чувственных переживаний человека, проанализирована в статье [17]. При этом был детально рассмотрен, ставший классическим [23], пример ощущения “красного”. Проанализировав физические основы происходящих процессов, было отмечено, что необходимым условием восприятия красного является наличие пигментов красного, а также нормальное развитие ряда других составляющих зрительной системы. В нормальной зрительной системе сигналы поступают согласно описанному выше для обработки в область сенсорной карты, ответственной за красный цвет. Далее собирается коалиция нейронов, ответственных за красный цвет и восприятие соответствующего предмета. В результате прохожде-

ния сигналов по собранной коалиции осознания и происходит энергетическая реконструкция, которая и соответствует ощущению человека увиденного красного предмета. Следовательно, ощущение “красного” происходит в соответствии с сформулированным главным принципом функционирования мозга – преобразований сигналов и энергетических реконструкций. Будут ли эти энергетические реконструкции в мозге человека полностью соответствовать действительности? Ответ ясен: нет! Это связано с тем, что копия, а энергетическая реконструкция – копия, никогда не совпадает с оригиналом полностью.

Таким образом, был сделан вывод, что предложенная теория, сущность которой была кратко изложена выше, может быть отнесена согласно классификации монографии [24] к монистической материалистической теории сознания эмерджентного типа [12, 13, 17].

5. ПЕРСПЕКТИВЫ И ПРОБЛЕМЫ СОЗДАНИЯ СВЕРХРАЗУМА

Рассмотрение вопросов, связанных со сверхразумом, проводилось автором исходя из точки зрения, что человек – биологическая машина, а методологической основой являлись полная электронная интерпретация функционирования мозга и теория сознания человека, описанные выше. Вопросы первоначально рассматривались в [18] и более детально анализировались в [25, 26], поэтому здесь приведу краткую выдержку из указанных статей.

Для избегания недоразумений, прежде всего, определимся с ключевыми понятиями. Сверхразум – “это любой интеллект значительно превосходящий когнитивные возможности человека фактически в любых областях” [27]. Искусственный интеллект (ИИ) человеческого уровня (ИИЧУ) определяем как “способность освоить большинство профессий, по крайней мере тех, которыми мог бы владеть среднестатистический человек” [27]. Хотя и существует большое число определений понятия “интеллект”, автор считает наиболее удачным определение учебника [28]: “интеллект – способность к целенаправленному адаптивному поведению, в том числе умение извлекать пользу из опыта, решать задачи и логически рассуждать”.

Было условно выделено три направления создания ИИЧУ и сверхразума [25]: 1) материалистическое; 2) идеалистическое и 3) гибридное. Рассмотрим их.

В рамках материалистического направления было выделено два наиболее перспективных на настоящий момент времени вида [25]: 1) биологический интеллект; 2) электронный интеллект.

Биологический интеллект можно разделить на много уровней, наивысший из которых — человеческий. Так как Природа реализовала последний, то и ИИЧУ, в принципе, достигим. В книге [27] отмечено, что создание “сравнительно слабой формы сверхразума” путем “биологического улучшения интеллектуальных способностей”, по-видимому, будет возможно. В свое время подход биологического усовершенствования автором был назван “от имеющегося” [29], т.е. это вполне реальный путь достижения сверхразума [25]. Однако при глубокой модернизации важнейшими станут этические проблемы.

Электронный интеллект означает путь создания ИИЧУ и сверхразума на основе электроники. В соответствии с описанной полной электронной интерпретацией работы мозга можно сделать вывод о том, что создание ИИЧУ на основе электроники принципиально возможно, однако, для этого, судя по всему, придется воспроизвести ряд из отмеченных ранее свойств. К наиболее важным автор отнес следующие [18, 25]: 1) фантастический уровень интеграции; 2) аналогово-цифровой характер обработки информации; 3) малые энергетические затраты; 4) малые размеры; 5) гибридизация; 6) индивидуальность и пластичность нейронных цепей. Более детально было проведено сравнение свойств 1–4 с таковыми для современных ИС так как это возможно количественно [25]. Приведу основные результаты сравнения.

Взяв уровень интеграции нанoeлектронных ИС около 5×10^9 активных элементов, была дана оценка, что для достижения уровня интеграции мозга в твердотельной микро- и нанoeлектронике потребуется около 60 лет [18], даже если ее развитие будет продолжаться согласно закону Мура, что проблематично. При оценке за ориентир был взят уровень интеграции мозга в 10^{19} активных элементов. Даже, если взять указанный нижний предел в 10^{17} , оценка по времени сильно не изменится.

Сравнение по энергопотреблению также показало, что мозг человека вне конкуренции [25]. Оценка была проведена, как это принято в микро- и нанoeлектронике, по работе A на одно переключение активного элемента [30]. При этом использовалась формула [30]

$$A = P\tau = IV\tau,$$

где P — потребляемая мощность. Согласно известным нейробиологическим данным [31]: ток I , проходящий через каналы, т.е. НЭМС, — единицы пА, изменение напряжения V на них в среднем несколько десятков мВ (максимальное значение около 100 мВ), среднее время открытия канала τ — 1–2 мс. В результате A ориентировочно лежит в диапазоне (10^{-16} – 10^{-17}) Дж на переключение. В то же время согласно прогнозу [32] энергия переключе-

ния для транзисторов ИС в 2030 году достигнет 0.5×10^{-15} Дж на элемент.

Важно при этом также отметить, что энергопотребление мозга составляет всего от 10 до 25 Вт/час, а сам он весом 1500 г и объемом около 1700 мл. Именно такие цифры автор встречал в литературе (см., например, [14]). Подчеркну, что это невероятно мало и очень экономично для объекта электроники такого фантастического уровня интеграции активных элементов и размеров. ИС твердотельной электроники и здесь явно проигрывают.

Возможны три разновидности электронного интеллекта: 1) аналоговый; 2) цифровой; 3) аналогово-цифровой. Уже отмечалось, что характер обработки информации в мозге аналогово-цифровой, что очень важно [17]. Хотя хорошо известно, что аналоговые функции могут быть реализованы на цифровой основе (см., например, [33]), однако, как отмечалось автором, за это придется “заплатить” увеличением объемов, причем, судя по всему, существенным [25].

В результате проведенного анализа были сделаны следующие основные выводы [18, 25]: 1) Природа при создании мозга решила суперсложную оптимизационную комплексную проблему: а) взаимодействие различных сигналов (механических, оптических, тепловых, химических, электрических и др.); б) гибкости связей; в) малых энергетических затрат; г) малых размеров и др. Аналогичные проблемы в твердотельной электронике еще очень далеки от действительно оптимальных решений даже по отмеченному комплексу вопросов; 2) электронная реализация ИИЧУ в полном объеме в ближайшее время вряд ли возможна; 3) учитывая главный принцип функционирования мозга преобразования сигналов и энергетических реконструкций, воспроизведение, по крайней мере приближенное, сознания и квалиа в рамках электронного интеллекта, возможно в принципе; 4) в рамках материалистического направления (биологического и электронного интеллекты) реализация сверхразума возможна.

В рамках идеалистического направления можно выделить два пути создания ИИЧУ и сверхразума [25]: 1) полная эмуляция (полномасштабное моделирование) мозга; 2) разработка систем моделирования, реализующих ИИЧУ и сверхразум.

Первый путь полной эмуляции мозга многими специалистами считается перспективным. Для этого, однако, понадобится создать хотя бы удовлетворительную теорию функционирования мозга. Так как она в настоящее время отсутствует, то полная эмуляция “вряд ли будет осуществлена в ближайшем будущем” [27]. Автор считает предложенные теории сознания и комплексный подход исследования мозга перспективными для этой цели, хотя их

практическая реализация может потребовать значительных усилий.

Сопоставление различных оценок числа необходимых флопсов компьютеров для моделирования функционирования мозга человека было проведено в [25]. Так, оценка различных авторов варьируется в широком диапазоне от 10^{14} до 10^{18} флопс. Оценка автора для среднего числа активных элементов (каналов) в 10^{19} привела к диапазону от 10^{16} до 10^{19} флопс [25], что позволило сделать вывод о том, что производительности самого мощного суперкомпьютера (на настоящий момент времени это японский “Фугаку” с производительностью около 4.15×10^{17} флопс) может быть недостаточно для детального моделирования (полной эмуляции) мозга человека.

И тем не менее, даже приближенное моделирование мозга человека будет полезно, например, для “реставрации сознания” человека, теряющего его в результате прогрессирования деменции [25].

Так как быстродействие активных элементов современных ИС намного превосходит быстродействие активных элементов, то, в принципе, возможна реализация различных систем превосходящих мозг человека (второй путь). Наиболее интенсивно это направление с высоким уровнем ИИ (своеобразные прообразы ИИЧУ) развивается в поисковых системах при обработке больших объемов информации в компаниях Google, DeepMind, Amazon, IBM, Apple, Facebook, Baidu, Microsoft и др. (см., например, [25, 34]). В основу наиболее продвинутых таких систем, как правило, положены общие принципы машинного обучения, в частности глубинное (глубокое) обучение с использованием многоуровневых нейронных сетей.

Анализ этого направления в целом позволил автору сделать вывод [25], что даже самые передовые системы ИИ пока не могут сравниться с интеллектуальными возможностями человека по широте спектра и гибкости, способности к развитию, так как являются узкоспециализированными (специальными) системами (слабый ИИ). Не обладают сознанием и квалиа. Несмотря на это, данное направление – важнейшее в развитии ИИ.

Однако, по мнению автора, наиболее перспективным для создания ИИЧУ и сверхразума является гибридное направление [26], в котором используются компоненты как материалистического, так и идеалистического направлений. В этом случае, как правило, применяется электронное аппаратное обеспечение (hardware) и программное обеспечение (software). В последнее время выделяется путь создания интерфейсов “человек–машина” и “человек–компьютер”, который может быть отнесен к wetware (смесь software, hardware и биологии). Анализ указанных путей развития был проведен в [26], поэтому здесь приведу лишь основные результаты.

Было отмечено: 1) идеалистическое направление, строго говоря, относится к гибриднему, так как кроме моделирования для своей реализации требует использования компьютеров, т.е. материалистической основы; 2) к сверхразуму можно отнести вас с интернетом, а также некоторые варианты коллективного разума; 3) перспективным считается метод обратного проектирования (разработки) мозга, когда ИИ строится по образцу человеческого мозга, как правило, с использованием аппаратных компонентов и программного обеспечения.

В последнем случае автор видит определенные перспективы использования разработанных теории сознания и комплексного иерархического подхода исследования мозга. К наиболее известным глобальным программам, в которых предполагается применить этот метод следует отнести: BRAIN Initiative (США) и Human Brain Project (ЕС), подробно рассмотренных в [12, 26, 35]. Главной проблемой здесь будет необходимость разработки методов обработки гигантских объемов информации (в коннектоме человека около 10^{20} байт [36]). Перспективу автор видит в разработке специальных систем ИИ автоматической иерархической обработки получаемой информации.

Важный путь современных исследований – разработка систем нейроморфной электроники. К таким системам следует отнести: SyNAPSE, SpiNNaker, Neurogrid, HICANN. В их основу положены различные архитектурные решения с применением отличающихся, как правило, нанoeлектронных ИС. Отмечу также программу DARPA (Управление перспективных исследовательских проектов Министерства обороны США) “Когнитивные вычислительные системы” с амбициозными целями, ведущие к созданию ИИЧУ.

Несмотря на колоссальные сложности, автор считает метод обратного проектирования мозга важным путем, ведущим к разработке ИИЧУ.

Отмечу, что рядом специалистов метод обратного проектирования мозга считается затратным и можно попытаться создать более оптимальное устройство по сравнению с мозгом человека. К таким проектам можно отнести Open Cog, LIDA. Замечу, однако, что в этих проектах за основу взята определенная информация о мозге.

Интересным и перспективным в рамках данного направления следует считать создание разнообразных смесей (wetware). Отмечу следующие первые примеры: “стимосиверы” Х. Дельгадо [37], “щадающие методы стимуляции”, разработанные под руководством академика Н.П. Бехтеревой [38]. Успешными примерами интерфейсов “человек–машина” являются кохлеарные импланты, импланты сетчатки, экзоскелеты и др. Перспективным является использование различных микроэлектромеханических систем (МЭМС) и НЭМС [12]. Путь различных дополнений тела превраща-

ет человека в киборга, т.е. *кибернетический организм*. Киборгизация считается будущим человечества, в частности Р. Курцвейлом.

Итак, если и будут созданы компактные системы ИИЧУ и сверхразума, то, скорее всего, это произойдет в рамках гибридного направления. К основным направлениям развития в настоящее время следует отнести [26]: 1) продолжение усиления человеческого интеллекта; 2) симбиоз ИИ и человеческого интеллекта; 3) создание специализированных систем ИИ, прежде всего для обработки больших объемов данных.

Эволюция интеллекта, по мнению автора, будет происходить по “биологическому сценарию”. При этом было выделено три основных варианта [26]: 1) уничтожение менее развитого интеллекта более развитым; 2) подчинение менее развитого интеллекта более развитым; 3) мирное сосуществование интеллектов разного уровня. В связи с этим прогнозы специалистов нашего совместного существования со сверхразумом лежат в очень широком диапазоне, перекрывающих отмеченные варианты от крайне пессимистического (уничтожение человечества) до эйфорически оптимистического (безоблачного совместного существования). Детально пессимистические и оптимистические прогнозы развития событий были рассмотрены в статье [26], поэтому здесь отмечу только основные моменты.

Во-первых, так как практически невозможно предсказать поведение сверхразума, особое внимание необходимо уделить методам контроля над ним. К сожалению, ни один из известных предложенных методов контроля не обеспечивает полной надежной защиты. Поэтому уничтожение человечества не является невероятным сценарием развития событий. Перспективу, по-видимому, представит использование целого комплекса, иерархии методов контроля сверхразума, вплоть до его уничтожения.

Во-вторых, ситуация с безопасностью в области ИИ даже в более простых системах не вдохновляет. Известно огромное число случаев ошибок в них, приводящих даже к трагедиям, катастрофам. Особое беспокойство вызывает использование ИИ в различных системах вооружений.

В-третьих, с помощью систем ИИ уже достигнуты значительные успехи, прежде всего, в областях при обработке больших массивов данных, при принятии решений, требующих учета влияния множества факторов и возможных ситуаций. Ясно, что системы ИИ будут и далее развиваться, тем более, что в данную область вкладываются все более колоссальные инвестиции.

В-четвертых, возможно, нам необходимо изменить свой взгляд на развитие ИИ. Один из возможных вариантов развития ИИ — это симбиоз человека и систем ИИ. Второй взгляд — рассмат-

ривать системы ИИ как “наших детей”. Эта точка зрения полностью согласуется с вариантом “бессмертия”, реализованного Природой, когда мы, образно говоря, передаем “эстафетную палочку” следующим поколениям.

В-пятых, наивно полагать, что сверхразум, если он будет создан, не будет допускать ошибок. Это может происходить вследствие отсутствия у него, хотя бы иногда, полных исходных данных. И тем не менее, создание сверхразума будет величайшим достижением человечества, так как поможет нам решить ряд серьезных проблем в частности, освоения Вселенной, разработки методов лечения некоторых пока непобежденных болезней человека и многих других.

6. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, НАНОМАТЕРИАЛОВ И НАНОТЕХНОЛОГИЙ В ИССЛЕДОВАНИИ МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

Учитывая описанные интерпретацию мозга как объекта органической гибридной наноэлектроники и комплексный иерархический подход его исследования, особую перспективу представляет масштабное применение достижений наноэлектроники, наноматериалов и нанотехнологий (нанонаук в целом) для изучения и лечения мозга человека. Данный вопрос подробно рассматривался в пленарном докладе на Международной конференции КрыМиКо’2015 [39] в дальнейшем опубликованном в статье [12]. В связи с этим здесь выделю лишь основные моменты.

Предложенная интерпретация позволила связать психические заболевания с отклонением функционирования электрических (нейтронных) цепей мозга от нормальных режимов работы. Отклонения могут быть вызваны следующими основными факторами и их совместным влиянием [12]: 1) связанные с разрушением цепей; 2) вызванные неправильными связями функционирующих цепей; 3) определяемые изменением конструктивно-технологических и электрофизических параметров цепей, включая биохимические процессы в них. Отмечу, что индивидуальность нейронных цепей фактически и является предопределяющей материальной основой субъективности [12], а следовательно, и психических заболеваний.

Наиболее существенные и очевидные нарушения в функционировании цепей связаны с факторами групп 1 и 2, и именно на их установление нацелен проект по коннектому человека [36]. Ситуация намного сложнее с факторами группы 3, поэтому они были более детально проанализированы в [12, 39].

Так, биохимические процессы, протекающие в процессе функционирования нейронных цепей, могут приводить к самым различным их мо-

дификациям, а именно [6, 7]: новым связям между нейронами; молекулярным изменениям в синапсах; синтезу РНК, белков, проводящих к структурным изменениям в синапсах, шипиках, дендритах, аксонах, ядре клетки и др. С точки зрения микро- и нанoeлектроники эти модификации по сути являются изменениями в конструктивно-технологических и электрофизических параметров соответствующих участков электрических (нейронных) цепей. Понятно, что влияние таких изменений может быть важным, что, по существу, и подтверждают многочисленные экспериментальные данные для различных психических расстройств (см., например, [35, 40]). Замечу, что к наномасштабу относятся объекты, в которых хотя бы одно из измерений находится в диапазоне от 1 до 100 нм. Именно в этом диапазоне находятся характеристические размеры основных биологических структур мозга (гены, каналы в мембранах, ДНК, РНК, нейромедиаторы, белки и др.). Это принципиально важно, так как при создании мозга Природой интенсивно использовались нанобъекты.

Таким образом, главным направлением при лечении психических заболеваний должно быть восстановление нормального функционирования поврежденных вследствие отмеченных факторов электрических (нейронных) цепей мозга или иная корректировка их работы [12], причем особую перспективу для этого могут представить наобъекты.

В работах [12, 39] были выделены основные задачи, которые могут решаться с использованием нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий (нанонаук в целом), а именно: 1) исследование; 2) лечение; 3) диагностика; 4) мониторинг; 5) контроль нейронных цепей и других составляющих мозга. Следовательно, стратегическими направлениями должны стать разработки новых инструментов и методов лечения, так как для них, к сожалению, в настоящее время характерен общий недостаток – грубость [12].

Отмечу лишь несколько перспективных направлений из выделенных в [12, 39]: 1) интерфейсы “мозг–машина” (“мозг–компьютер”), включая нейроимпланты, нейрочипы, нейрокомпьютеры; 2) использование различных МЭМС и НЭМС; 3) стимуляция глубинных структур мозга с помощью более миниатюрных электродов, наноприборов (нанотрубки, нанoeлектроды, наносенсоры и др.); 4) восстановление электрических связей между нейронами и нейронными цепями с использованием проволок, трубок с диаметром микрометрового и нанометрового диапазонов, в том числе доставки химических средств; 5) устройства оптогенетики; 6) в качестве средств доставки необходимых материалов могут использоваться различные микро- и нанобъекты, например, сферы, частицы, капсулы, цилиндры и др.,

при использовании различных воздействий (электромагнитных, ультразвуковых, тепловых и др.).

Кардинальным решением ряда отмеченных задач может быть возврат к идее Р. Фейнмана и А. Хибса, которая сначала казалась многим несерьезной, о создании “микроскопических роботов”, “крошечных механических “хирургов”, “крошечных автоматов” [41]. Успех здесь может быть достигнут путем создания ремонтных бригад микро- и нанороботов с использованием достижений нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий (нанонаук в целом).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье проведен обзор работ автора, связанных с мозгом человека. Изложена суть предложенной полной интерпретации функционирования мозга. В частности, мозг интерпретирован как объект органической гибридной нанoeлектроники. С точки зрения автора, ключевыми активными элементами в нейронных (электрических) цепях мозга являются каналы (ионные каналы, ионные насосы и др.) – НЭМС с характеристическими размерами в нанометровом диапазоне. Принципиально важным для этой интерпретации является уровень интеграции мозга человека, который согласно оценке автора, лежит в диапазоне 10^{17} – 10^{21} активных элементов. Этот фантастический уровень интеграции мозга человека позволяет наметить комплексный иерархический подход исследования мозга, основанный на подобию с современными методами анализа известных объектов твердотельной нанoeлектроники, несмотря на то, что задача здесь грандиозной сложности. Рассмотрев феномен сознания человека в рамках разработанной теории, удалось выделить главный принцип функционирования мозга при обработке информации – принцип преобразований сигналов и энергетических реконструкций. На этой методологической основе рассмотрены перспективы и проблемы создания сверхума. Проанализированы как пессимистический, так и оптимистический вариант развития событий. К сожалению, самый трагический вариант (уничтожение человечества) не является невероятным сценарием развития событий. В соответствии с предложенной интерпретацией мозга как объекта органической гибридной нанoeлектроники показана большая перспектива использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий (нанонаук в целом) в его исследовании и лечении. Последнее представляется особенно важным.

Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность Владимиру Федоровичу Лукичеву за ценные замечания, позволившие улучшить статью, а также моим ученицам Н.В. Коломейцевой и И.Ю. Щербаковой за подготовку рукописи работы к печати.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *Абрамов И.И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34–37.
3. *Абрамов И.И.* Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники // “Нанотехнологии — 2012”. Труды Международной научно-технической конференции. г. Таганрог. Ростовская область. Россия. 25–29 июня, 2012. С. 17–18.
4. *Абрамов И.И.* Мозг — объект нанoeлектроники // 22-я Международная Крымская конференция “СВЧ — техника и телекоммуникационные технологии”. Материалы конференции. Крым Украина 2012. Т. 1. С. 17–19.
5. *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.
6. *Абрамов И.И.* Мозг как объект электроники. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2012. 80 с.
7. *Abramov I.I.* Brain as an Object of Electronics. LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrücken, Germany, 2013. 76 p.
8. *Абрамов И.И.* Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 1. С. 52–54.
9. *Абрамов И.И.* Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2013. № 3. С. 45–53.
10. *Абрамов И.И.* Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 5. С. 45–54.
11. *Абрамов И.И.* Мозг — объект органической гибридной нанoeлектроники, или взгляд со стороны. Часть IV // Нано- и микросистемная техника. 2013, № 6. С. 49–53.
12. *Абрамов И.И.* Перспективы использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в исследовании и медицине мозга человека // Нано- и микросистемная техника. 2016. № 1. С. 49–64.
13. *Абрамов И.И.* Сознание человека, или возможности электроники. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 5. С. 308–320.
14. *Магрини М.* Мозг. Инструкция пользователя. М.: Изд-во АСТ, 2019. 288 с.
15. *Херкулано-Хузел С.* Мозг. Такой ли он особенный? М.: Изд-во АСТ, 2019. 288 с.
16. *Шепард Г.* Нейробиология: в 2-х т. Т. 1. М.: Мир, 1987. 454 с.
17. *Абрамов И.И.* Сознание человека, или возможности электроники. Часть III // Нано- и микросистемная техника. 2019. Т. 21. № 9. С. 555–574.
18. *Абрамов И.И.* Сознание человека, или возможности электроники. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2018. Т. 20. № 6. С. 368–384.
19. *Абрамов И.И.* Мозг человека — шедевр естественной электроники. Проблемы и перспективы исследования // Материалы Междунар. науч.-техн. конф. “Актуальные проблемы радио- и кинотехнологий”. 2017. Россия. Санкт-Петербург. С. 79–86.
20. *Канеман Д.* Думай медленно... решай быстро. М.: Изд-во АСТ, 2016. 653 с.
21. *Cognition, brain, and consciousness. Introduction to cognitive neuroscience. Second Edition / Ed. by Baars V.J., Gage N.M.. Amsterdam: Elsevier, 2010. 658 p.*
22. *Деан С.* Сознание и мозг. Как мозг кодирует мысли. М.: Карьера Пресс, 2018. 416 с.
23. *Чалмерс Д.* Сознание: В поисках фундаментальной теории. М.: УРСС: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2013. 512 с.
24. *Revonsuo A.* Consciousness. The Science of Subjectivity. Hove and New York: Psychology Press, Taylor & Francis Group. 2010. 324 p.
25. *Абрамов И.И.* Перспективы и проблемы создания сверхума. Часть I // Нано- и микросистемная техника. 2020. № 1. С. 46–56.
26. *Абрамов И.И.* Перспективы и проблемы создания сверхума. Часть II // Нано- и микросистемная техника. 2020. № 2. С. 112–120.
27. *Бостром И.* Искусственный интеллект. Этапы. Угрозы. Стратегии. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2016. 496 с.
28. *Майерс Д.* Психология. Мн.: Попурри, 2006. 848 с.
29. *Абрамов И.И.* Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники. IV. Квантовомеханические формализмы // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 2. С. 24–32.
30. *Валиев К.А.* Микроэлектроника: достижения и пути развития. М.: Наука, 1986. 144 с.
31. *Николлс Дж.Г., Мартин А.Р., Валлас Б.Дж., Фукс П.А.* От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
32. *International technology roadmap for semiconductors 2.0: 2015 Edition. Executive report.*
33. *Абрамов И.И., Дворников О.В.* Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем. Мн.: Акад. упр. при Президенте Республики Беларусь, 2006. 286 с.
34. *Метц К.* Создатели искусственного гения: О бунтарях, которые наделили интеллектом Google, Facebook и весь мир. Минск: Попурри, 2021. 320 с.
35. *Каку М.* The future of the mind: the scientific quest to understand, enhance, and empower the mind. New York: Doubleday Publishers, 2014. 400 p.

36. *Seung S.* Connectome: How the brain's wiring makes us who we are. New York: Houghton Mifflin Harcourt. 2012. 384 p.
37. *Дельгадо Х.* Мозг и сознание. М.: Мир, 1971. 264 с.
38. Лечебная электрическая стимуляция мозга и нервов человека / Под общ. ред. Н.П. Бехтеревой. М.: АСТ; СПб.: Сова; Владимир: ВКТ, 2008. 464 с.
39. *Абрамов И.И.* Перспективы использования нанoeлектроники, наноматериалов и нанотехнологий в медицине мозга человека // 25-я Международная Крымская конференция "СВЧ – техника и телекоммуникационные технологии". Материалы конференции. Крым, Севастополь 2015. Т. 1. С. 25–26.
40. *Джуан С.* Странности нашего мозга. М.: РИПОЛ классик. 2011. 352 с.
41. *Фейнман Р.* Внизу полным-полно места: приглашение в новый мир // Химия и жизнь – XXI век. 2002. № 12. С. 20–26.