

**Игорь Абрамов**

**Мозг как объект электроники**

**Монография**

Библиотека ВГУИР

## **Impressum / Выходные данные**

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek: Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Alle in diesem Buch genannten Marken und Produktnamen unterliegen warenzeichen-, marken- oder patentrechtlichem Schutz bzw. sind Warenzeichen oder eingetragene Warenzeichen der jeweiligen Inhaber. Die Wiedergabe von Marken, Produktnamen, Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen u.s.w. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutzgesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Библиографическая информация, изданная Немецкой Национальной Библиотекой. Немецкая Национальная Библиотека включает данную публикацию в Немецкий Книжный Каталог; с подробными библиографическими данными можно ознакомиться в Интернете по адресу <http://dnb.d-nb.de>.

Любые названия марок и брендов, упомянутые в этой книге, принадлежат торговой марке, бренду или запатентованы и являются брендами соответствующих правообладателей. Использование названий брендов, названий товаров, торговых марок, описаний товаров, общих имён, и т.д. даже без точного упоминания в этой работе не является основанием того, что данные названия можно считать незарегистрированными под каким-либо брендом и не защищены законом о брендах и их можно использовать всем без ограничений.

Coverbild / Изображение на обложке предоставлено: [www.ingimage.com](http://www.ingimage.com)

Verlag / Издатель:

LAP LAMBERT Academic Publishing

ist ein Imprint der / является торговой маркой

AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG

Heinrich-Böcking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland / Германия

Email / электронная почта: [info@lap-publishing.com](mailto:info@lap-publishing.com)

Herstellung: siehe letzte Seite /

Напечатано: см. последнюю страницу

ISBN: 978-3-659-22930-5

Copyright / АВТОРСКОЕ ПРАВО © 2012 AV Akademikerverlag GmbH & Co. KG

Alle Rechte vorbehalten. / Все права защищены. Saarbrücken 2012

“И все это может сделать одна только физиология, так как она одна держит в своих руках ключ к истинно-научному анализу психических явлений.” И.М. Сеченов [1].

“Электрические изменения, которые вызывают регистрируемые нами переменные токи разной частоты и амплитуды, возникают в клетках самого мозга. Несомненно, что это их единственный источник. Мозг следует описывать как обширный агрегат электрических элементов, столь же многочисленных, как звездное население Галактики.” Грей Уолтер [2].

## Содержание

Предисловие.....	5
Введение.....	9
1. Почему мозг может интерпретироваться как объект органической гибридной наноэлектроники?.....	13
2. Как приблизительно функционирует мозг с точки зрения специалиста в области электроники?.....	15
3. Достаточно ли для описания работы мозга, включая сознание, мысль, другие психические функции, квантовой механики?.....	35
4. Как далее исследовать мозг?.....	41
5. А что же дальше? .....	55
Заключение.....	61
Список литературы.....	63

## Предисловие

В монографии дается интерпретация мозга как объекта электроники, в частности объекта органической гибридной наноэлектроники. Автор назвал ее последовательной электронной интерпретацией. С моей точки зрения она позволяет более глубоко понять принципы функционирования мозга. Если коротко, то мозг – это очень “хитрая” электроника – оригинальное приемно-передающее устройство в одном объекте – шедевр на основе элегантного взаимодействия электрических и химических процессов, созданный Природой.

Прежде чем сформулировать предлагаемую интерпретацию, в течение нескольких лет автору пришлось интенсивно изучать разнообразную литературу о мозге в первую очередь в нейрофизиологии, нейропсихологии и психологии в целом, а также в нейрокибернетике. Это был подготовительный период работы. Ссылки на основные литературные источники приведены в конце книги.

Сама же работа была вчерне написана в период с 26 февраля по 17 июня 2012 года, и являлась самой захватывающе интересной и одновременно очень тяжелой в моей жизни. Если бы не опыт в “марафонской работе” в течение восьми лет над моим циклом из восьми статей, опубликованным в журнале “Нано- и микросистемная техника” (Россия) в период с 2006 года по 2010 год (ссылки на них есть в книге), я вряд ли бы написал предлагаемую читателю книгу.

Далее последовали доклады на трех престижных Международных конференциях.

Первый пленарный доклад (30 минут) был сделан в г. Таганроге 27 июня 2012 года (И.И. Абрамов. Мозг – объект органической гибридной наноэлектроники // Труды Международной научно-технической конференции “Нанотехнологии–2012”, г. Таганрог, Ростовская область, Россия, 25–29 июня 2012 г., с. 17–18. Публикация доступна на сайте [www.fep.tti.sfedu.ru](http://www.fep.tti.sfedu.ru)) у моего российского друга – Бориса Георгиевича Коноплева.

Второй пленарный доклад (30 минут) был сделан в г. Севастополе 10 сентября 2012 года (И.И. Абрамов. Мозг – объект наноэлектроники // 22-я Международная Крымская конференция “СВЧ-техника и

телекоммуникационные технологии”. Материалы конференции. 10–14 сентября 2012 г., Севастополь, Крым, Украина. Т.1, с. 17–19.), где у меня много друзей и знакомых.

Третий устный доклад (30 минут) был сделан в пансионате “Подмосковные Липки” 2 октября 2012 г. (I.I. Abramov. The brain is a nanoelectronic object // International Conference “Micro- and Nanoelectronics – 2012”, ICMNE – 2012. Book of Abstracts, October 1st–5th, 2012, Moscow–Zvenigorod, Russia, 01-10.), где у меня также много друзей и знакомых.

Доклады вызвали просто “шквал” вопросов. Подготавливая эти доклады, автор преследовал две цели. Во-первых, доложить основные идеи проделанной работы. Во-вторых, выявить ее возможные слабые места, требующие пояснений. Эти цели были достигнуты. Мнения были очень разнообразными. Начиная от восторженных, и заканчивая, мягко говоря, не очень. Правда, как всегда, по-видимому, где-то посередине. Так, ряд маститых ученых посчитали, что “так оно и есть”. Было даже мнение, что “работа заслуживает сразу двух Нобелевских премий. Одной – по физике, а другой – по химии”. На это автор просто отшутился: “Дали бы хотя бы одну”. В кулуарах были и такие предложения: “Надо его поставить на место”. Последнее, к сожалению, часто встречается в нашем “славянском мире” и состоявшихся ученых не удивляет. Многие через это проходили. Автор тут далеко не первый. Интересно заметить, что наиболее жесткие высказывания, как правило, звучали со стороны ученых, которые вообще не имели публикаций и докладов, не говоря уже о пленарных, в частности, на второй конференции. Как в народе говорится: “критиковать – легко, а сделать – сложно”. Были и предложения назвать мозг объектом “наноионики”. Автор не пошел по пути введения новых терминов. В работе была практически использована уже известная терминология. Все остальное, включая словосочетания, пояснялось. Это сделано умышленно для того, чтобы не усложнять далее и без того очень сложную область. Хотелось сделать работу понятной достаточно широкому кругу читателей, включая студентов. Кстати, узнав об этой работе, не меньший “шквал” вопросов был и у моих студентов. При этом лекция по предмету часто просто прекращалась. По изложенным причинам мною используются известные термины нейрофизиологии, нейропсихологии, психологии в целом и электроники. Работа была подготовлена к печати 19 июля 2012 года. Прошедшие дискуссии еще более

убедили автора в моей правоте, и поэтому работа публикуется фактически без правок. Я ограничиваюсь только лишь предисловием.

Не могу, однако, не отметить следующее. После завершения работы в жизни автора начали возникать серьезные кризисные ситуации. После операции в июле месяце 14 августа умер отец, очень тяжело заболела мать и др. Автор не верит в Бога, однако, по-видимому, все же существует “тотальный закон сохранения в Природе”. Мой друг – Илья Андреевич Обухов даже сказал: “Игорь, оставь эту работу”.

И тем не менее я решил опубликовать монографию, надеясь на то, что мой читатель будет доброжелательным и вдумчивым. О ее публикации также просили очень многие из слушавших мои доклады, а также студенты. Думаю, что многие вопросы, которые у них возникали, будут сняты после ознакомления с книгой. Итак, насколько автор прав, конечно же, судить читателю.

## Введение

Функционирование мозга – одна из самых грандиозных проблем Человека и загадок Природы.

С одной стороны, очень много работ посвящено этой проблеме, начиная от серьезных научных исследований и заканчивая религиозными и фантастическими произведениями. И проанализировать их все попросту невозможно. Автор и не ставил этой задачи, но все же старался изучить наиболее значимую литературу, относящуюся к рассматриваемому вопросу. Сразу же хочется отметить огромное количество общих, обтекаемых формулировок, утверждений, различного рода усложнений, догадок, новых терминов, понятий и т.п., что, прежде всего, свидетельствует об исключительной сложности проблемы. Это отмечается и некоторыми другими исследователями. Поэтому многие последующие (вслед за описывающими в целом верно функционирование мозга) работы могут при желании быть интерпретированы как частный случай предыдущих, т.е. в лучшем случае их поясняющие и уточняющие.

В этом плане очень показателен анализ состояния проблемы условного рефлекса после И.П. Павлова, проведенный известным советским ученым Э.А. Асратяном. В частности, его понимание (интерпретация) слов великого физиолога привело его к выводу, что “выдвинутые позднее представления о “клеточных ансамблях” (Хебб), “образе внешнего мира” (Бериташвили), “нервной модели” (Соколов) и “местном условном состоянии” (Асратян) являются повторением или развитием идеи И.П. Павлова” [3]. Вследствие отмеченного, и, в принципе, предлагаемая читателю работа может рассматриваться как уточнение к приведенным всего лишь двум эпитафиям. Для большей полноты можно еще добавить следующее высказывание: “... мозг является устройством для передачи информации. Этим способом он поддерживает отношения со всем остальным миром. Все другое несущественно” [4]. И тем не менее, хотелось бы кое-что уточнить, т.е. большей детализации, и тем самым продвинуться чуть дальше, так как неудовлетворенность нашими знаниями о функционировании мозга остается.

С другой стороны, целесообразно вспомнить следующие слова великого русского физиолога И.П. Павлова: “После славных побед науки над мертвым миром пришел черед разработки и живого мира, а в нем и венца земной

природы – деятельности мозга. Задача на этом последнем пункте так невыразимо велика и сложна, что требуются все ресурсы мысли: абсолютная свобода, полная отрешенность шаблонов, какое только возможно разнообразие точек зрения и способов действия и т.д., чтобы обеспечить успех. Все работники мысли, с какой стороны они не приходили бы к предмету, все увидят нечто на свою долю, а доли всех рано или поздно сложатся в разрешении величайшей задачи человеческой мысли” [3].

В данной работе мозг рассматривается с точки зрения специалиста в области микро- и наноэлектроники\*, т.е., проще говоря, электроники, с минимальным количеством терминов и понятий. Цель монографии – попытка ответить на следующие вопросы:

- 1) почему мозг может интерпретироваться как объект органической гибридной наноэлектроники?
- 2) как приблизительно функционирует мозг с точки зрения специалиста в области электроники?
- 3) достаточно ли для описания работы мозга, включая сознание, мысль, другие психические функции, квантовой механики?
- 4) как далее исследовать мозг?
- 5) а что же дальше?

При ответах на эти вопросы автор прежде всего руководствовался очень красивой и современной формулировкой (развитием), по существу, изложенной в эпиграфе гениальной мысли великого русского физиолога Ивана Михайловича Сеченова, которая названа в прекрасной книге [7] “центральной догмой” нейробиологии”, а именно: “Все, что будет говориться ..., основано на предположении, что все нормальные функции здорового мозга и все их патологические нарушения, какими бы сложными они ни были, можно в конечном счете объяснить исходя из свойств основных структурных компонентов мозга. Мы называем это утверждение нашей “центральной догмой””. Подобные “рабочие гипотезы” изложены также в книгах Д. Вулдриджа [5] и Х. Дельгадо [8]. Аналогичных взглядов придерживаются

---

\* Почему бы и нет. Ведь рассматривался этот вопрос с точек зрения физиков (см., например, [5]), математиков (см., например, [6]).

многие нейрофизиологи, начиная с Рамон-и-Кахала С., в том числе многие из цитируемых здесь.

Анализ будет основываться на профессиональных знаниях автора в области физики и, конечно же, электроники, а также фундаментальных сведениях из нейрофизиологии (см., например, [9–12]), нейропсихологии (см., например, [13,14]) и психологии в целом (см., например, [15–17]). Следует особо подчеркнуть, что чрезвычайно важным в этом анализе является его согласование (во всяком случае непротиворечие) с принципами и другими фундаментальными положениями отмеченных специальных дисциплин о мозге, подтвержденными экспериментально. Позиция автора начала формироваться под влиянием следующих блестящих книг [2,5,8,18,19]. Сюда же необходимо добавить и легендарные работы Дж. фон Неймана [6, 20–22]. Все, что пишется мною в дальнейшем, необходимо рассматривать всего лишь как попытку дальнейшего развития идей этих выдающихся исследователей. И это я тоже не могу не отметить.

## 1. Почему мозг может интерпретироваться как объект органической гибридной наноэлектроники?

Поясним данную интерпретацию мозга\* [23] как объекта естественной электроники, созданного Природой, более детально.

Сначала приведем лишь следующие факты:

- 1) ключевое значение для передачи информации в мозге имеют два типа электрических сигналов [12]: местные (градуальные) потенциалы, локализованные в специализированных участках нейрона, и потенциалы действия, которые передаются по всей протяженности нервной клетки;
- 2) все воздействия на организм человека “конвертируются (или трансформируются) в электрический сигнал” с последующим распознаванием в центральной нервной системе [12];
- 3) “вегетативные и соматические функции, индивидуальное и общественное поведение, эмоциональные и психические реакции у человека и животных можно искусственно вызывать, поддерживать, видоизменять или подавлять путем электрического раздражения определенных отделов мозга” [8].

Этих известных фактов нейрофизиологии и нейропсихологии, в принципе, достаточно, чтобы интерпретировать мозг в качестве объекта естественной электроники. Однако двинемся дальше по пути детализации (указанной выше в вопросе интерпретации), сделав предварительно несколько комментариев.

Во-первых, факт 2 свидетельствует о том, что Природа отдала предпочтение среди механических, оптических, тепловых, химических, электрических и других сигналов, которые могут воздействовать на человека, именно электрическим для последующей обработки информации в мозге как наиболее универсальным (в них относительно легко могут быть конвертируемы и отмеченные другие сигналы) и в то же время достаточно быстродействующим сигналам, т.е. выбраны оптимальные сигналы.

---

\* Впервые эта интерпретация прозвучала на 11-й Международной конференции “СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии”, КрыМиКо’2001 (10–14 сентября 2001 г., г. Севастополь) в ответе автора на вопрос о достижениях в области наноэлектроники.

Во-вторых, среди многочисленных аналогий (см., например, [7]) наиболее близкими к мозгу искусственными объектами являются: компьютер [6], телевизор [3,24], интегральная схема (ИС) [23], т.е. изделия электроники. А из отмеченных, с точки зрения автора, именно ИС. Как будет следовать из дальнейшего рассмотрения, этот аргумент будет также иметь немаловажное значение, усиливая целесообразность анализа мозга в качестве объекта электроники.

В настоящее время разграничение между ИС микро- и нанoeлектроники осуществляется по характеристическим размерам их активных элементов. В частности, к ИС нанoeлектроники отнесены схемы, включающие активные элементы (транзисторы, диоды и т. п.) с указанными размерами, по крайней мере, в одном из измерений в нанометровом диапазоне (от 1 до 100 нм) [25,26]. Какие же структуры имеют ключевое значение для мозга? Отметим, что все варианты электрической активности нейронов в мозге “зависят, в конечном счете, от активации или деактивации ионных каналов, регулирующих ионные токи через мембраны нервных клеток” [12]. В то же время конформационные изменения (переходы) белков каналов, как правило, и приводят к их открытию или закрытию [27]. Основные размеры этих активных элементов, т. е. белков и/или их субъединиц (доменов), определяющих свойства ионных каналов, по крайней мере, в одном из измерений как раз и лежат в нанометровом диапазоне [12]. По изложенным (и не только, см. также далее) причинам определяющими для мозга элементами будем считать органические молекулы: ДНК, РНК и др., т. е. делающими его именно мозгом.

Традиционно в нейрофизиологии утверждается, что кроме электрических в мозге принципиально важное значение для передачи информации имеют также химические процессы [7,11,12,28]. А, вообще говоря, влияние могут оказывать и другие процессы. Так, еще Дж. фон Нейман [6] отметил, в частности, важность и механических процессов (конформационные переходы белков).

Резюмируя изложенное выше, *мозг может интерпретироваться как объект органической гибридной\* нанoeлектроники.*

---

\* Гибридной потому, что здесь важны не только электрические процессы, но и, по крайней мере, химические.

## 2. Как приблизительно функционирует мозг с точки зрения специалиста в области электроники?

Основная сложность рассмотрения функционирования мозга, особенно различных психических функций, на строгом нейрофизиологическом уровне связана с тем, что при его работе имеет место очень своеобразный “запутанный клубок” большого числа физико-химических процессов часто взаимосвязанных. Для того, чтобы попытаться его “распутать” в соответствии с приведенной интерпретацией, *примем следующую гипотезу: будем считать, что доминирующее влияние на функционирование мозга оказывают электрические процессы.* Таким образом, считается, что обработка информации в мозге идет в основном на уровне электрических процессов. Что же обеспечивает другой вид принципиально важных процессов? Химические процессы\* обеспечивают питание электрических цепей мозга, а также их модификацию. Посмотрим что из этого получится.

Прежде чем отвечать на поставленный вопрос кратко охарактеризуем состояние проблемы согласно данным специальных дисциплин о мозге. В настоящее время явно выделяются два уровня описания работы мозга, а именно: нейрофизиологический и нейропсихологический.

Очень краткое и емкое резюме по поводу работы мозга и нервной системы в целом на нейрофизиологическом уровне дано в прекрасном учебнике [16]: “Нервная система человека состоит из миллиардов отдельных клеток, называемых *нейронами*. Нейрон получает сигналы от других нейронов через ответвления дендритов и клетку, объединяет эти сигналы в клетке и передает электрический импульс (потенциал действия) по аксону. Когда эти сигналы достигают концевых волокон аксона, они стимулируют выход химических посланников, называемых *нейротрансмиттерами* или *медиаторами*. Эти молекулы передают свои возбуждающие или тормозящие импульсы, когда пересекают синаптический промежуток между нейронами и попадают на рецепторные участки соседних нейронов.”

Отметим два важных для нас в дальнейшем момента. Во-первых, согласно данным нейрофизиологии обработка информации в мозге, а также различные психические функции связываются с работой нейронных ансамблей.

---

\* Интересна их роль в химических синапсах (см. далее).

Предоставим слово блестящему советскому и российскому нейрофизиологу академику Наталье Петровне Бехтеревой и ее коллегам [19]: “Предположение о том, что сложные функции мозга реализуются не отдельными нервными клетками, а их системами, возникло давно. Так, еще в 1949 г. Хебб (Hebb, 1949) определил нейронный ансамбль как гипотетическое объединение нейронов, формирующееся в процессе обучения и выполняющее определенную функцию. Экспериментальные доказательства существования таких систем функционально объединенных нервных клеток, общие принципы их организации были представлены позднее в ряде работ (Mountcastle, 1957; Hubel, Wiesel, 1968; Коган, 1979 и др.).” Мы будем придерживаться этой ставшей канонической для нейрофизиологии точки зрения. Необходимо сразу же отметить большое число названий для таких разнообразных форм объединений (ассоциаций) нейронов в литературе. Приведем лишь некоторые [29]: нервные сети и сеточки, ансамбли и микроансамбли нейронов, нейронные модули, нейронные колонки, нейроценозы, популяции нейронов, функциональные модули, бочонки, микросистемы. В данной работе в дальнейшем для таких объединений будет использоваться (за исключением цитат) термин “нейронная цепь” [5], как наиболее полно отвечающий ее цели.

Во-вторых, приведенное выше описание (резюме), строго говоря, приведено для случая соединений между нервными клетками в виде синапсов с химической передачей (первый тип). Необходимо отметить, что в мозге также имеются синапсы с электрической передачей (второй тип), а также химической и электрической передачей, т. е. смешанного (третьего) типа. Однако сразу же заметим, что синапсов первого типа в мозге большинство [12,30].

Наиболее кратко и в то же время емко работа мозга на нейропсихологическом уровне описана в другом блестящем учебнике [14]: “... мозг представляет собой сложную единую метасистему, состоящую из различных макросистем (проекторных, ассоциативных, интегративно-пусковых, лимбико-ретикулярных), каждая из которых строится из различных микросистем (микроансамблей). Интегративная деятельность систем разных уровней обеспечивается их иерархической зависимостью и горизонтально-горизонтальными... и вертикально-горизонтальными... взаимодействиями. Динамичность мозговых структур, их индивидуальная изменчивость достигается за счет динамичности и изменчивости составляющих их

микросистем. Качества динамичности и изменчивости присущи разным системам в разной степени.”

И в то же время оценка нашего сегодняшнего понимания работы мозга при реализации сложных психических функций, включая мышление, хорошо и точно охарактеризована в книге [7]: “Обобщение рабочих принципов более или менее изученных систем может действительно привести и к пониманию более сложных процессов, близких к мышлению, но все это еще далеко не ясно”.

Резюмируя сказанное, отметим следующее. Данные нейрофизиологии свидетельствуют о том, что наиболее важными для его работы являются электрические и химические процессы [7,11,12,28]. Более того, важность для понимания психических функций мозга электрических процессов отмечалась многими авторами [2,3,5,8,18,19]. И тем не менее, традиционно в специальных дисциплинах о мозге предпочтение отдается химическим сигналам, а не электрическим. Этот канонический взгляд выражает следующая фраза [31]: “Фундаментальным можно считать тот факт, что мозг представляет собой не столько электрическую, сколько химическую сеть взаимосвязей. В самих нейронах информация передается посредством электрических импульсов, но между нейронами – с помощью химических веществ”.

Почему же так получилось? Так как этот вопрос имеет принципиальное для нас значение, на него необходимо ответить. Считается, что именно опыты известного психолога К. Лэшли нанесли “смертельный удар по теории электрических цепей” [3], так как посчиталось достаточным, что нейронные цепи имеют разрывы (щели) в виде синаптических соединений (химический синапс). Своеобразный вердикт стал безжалостным и сейчас кратко может быть образно выражен фразой [12]: “... идея живого электричества имела столь сильное влияние, что прошло более 100 лет, прежде чем были получены доказательства, опровергающие предположение об электрической природе передачи возбуждения с нерва на мышцу, а также между нервными клетками”. Итак, “камнем преткновения” стал химический синапс.

Попытаемся, однако, разъяснить принципы работы мозга с использованием принятой нами гипотезы.

Прежде всего покажем, что *все элементы нейронных цепей мозга могут рассматриваться (интерпретироваться) в качестве элементов электрических цепей.*

Очень точная характеристика нейрона в целом дана Дж. фон Нейманом [21]: “...импульс представляет собой вырожденное состояние сложного электрохимического комплекса, каковым является нейрон, который – если провести полный анализ его функционирования – следует рассматривать как моделирующую машину”. Хотя в настоящее время существует огромное число упрощенных моделей нейронов (см., например, [32,33]), другая, более простая по сравнению с отмеченной и известная в литературе “электронная” интерпретация будет достаточна для нас на данном этапе, а именно: нейрон в целом является суммирующим генератором импульсов, работающим по принципу “все или ничего”. Нервные волокна (отростки), т.е. аксон, дендриты, шипики, входящие в нейрон, также могут интерпретироваться в качестве электрических элементов. Так, в настоящее время уже создана достаточно адекватная кабельная теория пассивной передачи электрического импульса вдоль аксона и дендритов, причем наиболее точные результаты получаются с помощью метода, когда нервное волокно разбивается на ячейки (compartments) [27]. В то же время для описания возникновения (генерации) потенциала действия в ответ на возбуждение необходимо обязательно учесть влияние ионных каналов, в частности их селективной проницаемости и потенциал-индуцированных конформационных изменений белков. Традиционно этот процесс описывается в биофизике с помощью феноменологических уравнений Ходжкина–Хаксли [27,34]. К сожалению, “эти уравнения не выведены на основе физических принципов, а получены эмпирически” [27]. Здесь уместно отметить, что такой вывод будет сделать крайне непросто, так как только ионные каналы являются достаточно сложными наноэлектромеханическими системами. Общее же число разнообразных каналов даже в одном нейроне может быть очень большим [11]. И тем не менее отмеченные теории позволяют объяснить возникновение (генерацию) и распространение потенциала действия, т.е. электрического сигнала, в нейроне [12].

“Камнем преткновения”, как уже отмечалось, стал химический синапс, имеющий принципиально важное значение для нейронных цепей, обеспечивая контакты между нейронами цепи. Итак, что же происходит в химическом синапсе согласно данным нейрофизиологии? “Нервный импульс приходит к

окончанию аксона и вызывает здесь высвобождение специальных нейромедиаторных молекул. Эти нейромедиаторы воздействуют на постсинаптическую мембрану так, что либо понижают ее мембранный потенциал, либо предотвращают его понижение. При понижении мембранного потенциала частота импульсации возрастает; мы назовем такой синапс *возбуждающим*. Если же мембранный потенциал вместо этого стабилизируется на подпороговом уровне, импульсы не возникают или возникают с меньшей частотой, и тогда синапс называют *тормозным* [11]. Что же мы имеем с точки зрения электроники? Возбуждающий и тормозной химический синапсы – это преобразователи частоты импульсов. В случае же тормозного синапса в режиме, когда импульсы не возникают вообще, мы имеем просто выключатель. Таким образом, и химический синапс\* является элементом электрической цепи! В связи с этим уместно заметить, что обычная электрическая батарейка, в которой тоже принципиально важны химические процессы, считается объектом электроники. И ни у кого это не вызывает даже тени сомнения.

В результате, *нейронная цепь мозга может интерпретироваться как нелинейная электрическая цепь!* Наиболее близкий искусственный аналог – интегральная схема.

Рассмотрим в чем заключаются основные отличия нейронных цепей (I-й тип) мозга в такой интерпретации от современных ИС микро- и наноэлектроники (II-й тип).

Во-первых, нейронные цепи основаны на органических материалах, а ИС – на неорганических материалах. Во-вторых, функционирование первых определяется ионной проводимостью, а ИС – электронной (и дырочной) проводимостью. Эти два фактора в целом и приводят к более медленному функционированию электрических цепей первого типа по сравнению с цепями второго типа. Казалось бы плохо. Однако такое более медленное поведение имеет, как будет показано, принципиальное значение и связано, прежде всего, с необходимостью взаимодействия (преобразования) электрических и химических процессов в мозге. Для этого, а также для того, чтобы

---

\* Отметим, что электронная интерпретация других типов синапсов не вызывает затруднений. Так, электрический синапс – нелинейная емкость с уткой или “электрический выпрямитель” [30]. Смешанный синапс может интерпретироваться как сочетание синапсов двух других типов. В целом, возможны и иные представления этих нелинейных элементов нейронных цепей (см. далее).

проанализировать третье важное отличие необходимо привлечь современные данные нейрофизиологии о том как формируются нейронные цепи (см., например, [7,12,16]).

“В общем виде можно сказать, что все части мозга в своем развитии проходят восемь главных стадий. (1) Клетки нервной пластинки детерминируются как будущие нейроны того или иного общего типа. Предполагают, что клетки мезодермы, лежащие под нервной пластинкой, выделяют какие-то сигнальные вещества, которые и воздействуют на растущие из энзимы клетки каким-то еще неизвестным образом. (2) Клетки детерминированного участка начинают делиться. (3) Эти клетки мигрируют к местам их промежуточного или окончательного назначения. (4) Достигнув места своей окончательной локализации, все еще незрелые нейроны начинают собираться в группы, из которых позже разовьются “ядра” взрослой нервной системы. (5) Эмбриональные нейроны, образующие скопления, перестают делиться и начинают формировать соединительные отростки. (6) Это приводит к раннему образованию связей и обеспечивает возможность синтеза и выделения нейромедиаторов. (7) В конце концов “правильные” связи стабилизируются, а клетки, связи которых оказались “неудачными” или слишком малочисленными, отмирают. Этот процесс известен как “запрограммированная гибель клеток”. (8) После того как общее число нейронов стабилизировалось, происходят незначительные изменения проводящих путей в соответствии с функциональной нагрузкой тех или иных систем” [7].

Итак, что наиболее важно для нас? Это констатация двух важнейших свойств нейронной цепи, а именно: она сначала растет, а впоследствии модифицируется. Таким образом, *нейронная цепь – это сначала растущая, а затем, модифицируемая электрическая цепь!* И в этом, пожалуй, самое главное и важное ее отличие (своеобразие) от ИС, которое и приводит к наиболее существенным преимуществам цепей первого типа над цепями второго. Что особенно восхищает в работе мозга, так это то, что общее количество нейронов с возрастом уменьшается\*, а при этом количество зафиксированной

---

\* Согласно современным данным относительно небольшое число новых нейронов при этом, судя по всему, может появляться [35].

информации, как правило, растет\*. Казалось бы парадокс! Что же в действительности происходит?

Опишем как работает мозг при фиксации и обработке информации в рамках предложенной интерпретации, используя при этом данные нейрофизиологии. Для простоты рассматриваем стадию модификации нейронной цепи.

Как уже отмечалось, после получения информации сенсорными рецепторами организма стимул соответствующей модальности *конвертируется* в электрический сигнал. При этом происходят преобразования, декомпозиция (расщепление, разделение) первичной информации в различных системах для последующего воссоединения на уровне обработки электрических сигналов нейронной цепью. Как же модифицируется сама цепь?

После возбуждения и прохождения электрического сигнала в нейронной цепи внутри нее (ее структурных элементов) запускаются сложные каскады биохимических реакций (ДНК → РНК → протеины и другие молекулярные структуры), которые создают основу в результате доставки по нервным волокнам (аксоны, дендриты) необходимых веществ и модификации в соответствующих местах топологии электрической цепи. Языком анатомии происходят регулярные морфологические изменения нейронной цепи. Если информацию необходимо зафиксировать на более длительный срок, то идет реверберация (повторный прогон) электрических сигналов по нейронной цепи для поддержания биохимических реакций. Причем ввиду экономичности и рациональности Природы *идет добавление информации к уже имеющейся, т.е. идет постоянная модификация* (возможно крайне незначительная в целях экономии) *кодирующей информацию цепи*. Так как входящая информация, как правило, характеризуется различными модальностями, то, хотя бы по этой причине, информация кодируется в различных областях мозга (нейронных цепей).

Казалось бы в этом случае Природа расточительна. Однако нет и тут она – гениальна. Во-первых, ввиду декомпозиции информации рациональнее подобную, хотя бы по модальности, информацию хранить в одной и той же области (рядом), так как модификаций нейронной цепи будет меньше. Необходимо также помнить, что мозг работает в определенных ограничениях

---

\* Имеется в виду, конечно же, нормально функционирующий мозг.

(количество нейронов уменьшается, объем мозга не возрастает, информация полностью не стирается, а, по-существу, “наслаивается”). Во-вторых, и может быть это даже более важно, благодаря этому достигается надежность в работе мозга, т.е. происходит определенное дублирование информации в различных участках мозга, что хорошо известно из нейрофизиологии и нейропсихологии [3,13,14,36]. В-третьих, и что самое интересное, эффективность обработки информации не падает, а возрастает вследствие параллелизма (см. далее). При этом следует учитывать, что информация хранится в сжатом (закодированном виде), а следовательно, не полна. Такая организация памяти оказывается в целом, несмотря на кажущуюся парадоксальность, при указанных ограничениях и достаточно экономичной.

Итак, мы приходим к еще одному важному отличию нейронных цепей от ИС. *Нейронные цепи мозга характеризуются крайне сложной (фактически индивидуальной) топологией.* Так, строго говоря, нет топологически одинаковых нейронов, включая тела клеток, аксоны, дендриты, шипики и др., и соединений – синапсов, хотя все эти элементы нейронной цепи и имеют определенные типы. И, в принципе, у каждого человека хранящаяся информация, прежде всего, кодируется именно в топологии нейронной цепи.

О важности топологии, в частности, свидетельствуют следующие данные для достаточно простого (элементарного) случая. В работе [27] приведены результаты моделирования при исследовании влияния всего лишь расширения аксона на поведение потенциала действия. Оказалось, что “в зависимости от диаметра расширения аксона потенциал действия может либо задерживаться, либо рефлексировать, либо прекращаться” [27], т.е. его поведение может меняться качественно. Следовательно, даже если рассматривать мозг в первом приближении (см. далее) как набор нейронных цепей (или просто нейронную цепь), то у каждого человека этот набор индивидуален. И в этом потрясающая изобретательность Природы. К сожалению, для современных ИС характерна именно регулярная топология.

Что же определяет индивидуальность нейронной цепи? “Большинство исследователей считает, что структурной основой памяти является нейронная реорганизация на базе стабильной синапсо-модификации” [37], т.е. фактически связывается с контактными системами между нейронами (синапсами) электрической цепи первого типа. Хотя и существуют отличные точки зрения

(см., например, [38]), она стала доминирующей в специальных дисциплинах о мозге [16]. Здесь лишь отметим мнение известного американского исследователя Дж. Эделмена о кандидатах на память, а именно [39]: "... новые дендритные связи, метастабильные изменения мембраны и поверхности клетки на дендритных шипиках, молекулярные изменения синапсов".

В то же время анализ современных данных нейрофизиологии показывает, что изменений, влияющих на нейронную цепь в процессе ее функционирования, может быть много, т.е. гораздо больше. Укажу лишь некоторые: 1) изменения в количестве медиатора, выделяемого в синапсах; 2) изменяется содержание ионов в нейронах, что влияет на активность клеток; 3) изменяется проводимость ионных каналов, вследствие изменения свойств белков; 4) изменяется количество ионных каналов проводимости; 5) происходит синтез РНК, белков, приводящих к структурным изменениям в синапсах, шипиках, дендритах, аксонах, изменениям в ядре клетки и др. Возможна и организация новых связей\* между нейронами. Так что факторов, влияющих на индивидуальность нейронной цепи – много. И это не только топология цепи. Т.е. все может быть гораздо сложнее, чем важность только синапсов, как считают многие нейрофизиологи. Каждый из "букетов" из отмеченного набора, по-видимому, и определяет вид памяти. Поэтому деление на мгновенную, кратковременную и долговременную память [14] является весьма условным\*\*. Замечу также, что многие авторы выделяют и другие виды памяти (см., например, [16,17,38,40]), в том числе в рамках указанных. Правильнее, по-видимому, говорить о разных фазах запоминания (записи информации), связанных с возможными разнообразными изменениями в нейронной цепи. Если информация важна, то она закрепляется в нейронной цепи, например, вследствие реверберации электрического сигнала (см. выше). Если она не важна, то просто не закрепляется, т.е. соответствующих изменений в нейронной цепи не происходит. При этом, по-видимому, и то и другое возможно в различных участках мозга, причем отличающиеся виды памяти не обязательно разделены в пространстве, т.е. могут быть разделены во времени.

---

\* Замечу, что может происходить и обратный процесс, т.е. "увядание" некоторых старых связей, хотя бы вследствие гибели нейронов, а также процессов забывания, старения. Могут происходить подобные изменения и в других старых модификациях.

\*\* Недаром в работе [17] они названы "гипотетическими компонентами памяти".

Итак, *нелинейная электрическая цепь первого типа характеризуется не только крайне сложной топологией, но и вариацией свойств составляющих ее казалось бы однотипных элементов (тела клеток, аксоны, дендриты, шипики, синапсы и др.)*. В современных ИС как раз стремятся наоборот уменьшить подобные девиации. Таким образом, с возрастом (после определенного этапа, см. ранее) происходят усложнения нейронных цепей не за счет увеличения числа нейронов, а за счет увеличения связей и других модификаций этих электрических цепей. В процессе модификации или перестройки электрических цепей первого типа (фиксации следов) 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 т.п.) являются нелинейными элементами электрической цепи (напомним, что даже аксон\* при пассивной передаче электрического сигнала целесообразно моделировать с использованием метода ячеек), свойства которых, как указывалось, могут зависеть от многих факторов. Следовательно, *химические реакции важны не только в качестве питания (источника энергии) электрических цепей первого типа, но и для их модификации!* Именно в первую очередь поэтому Природа не пошла по чисто “электронному пути”, а пошла по “гибридному пути”, т.е. элегантно взаимодействия электрических и химических процессов. Кроме того, отмечу и еще две причины. Вследствие приема разнообразной информации (зрительной, слуховой, вкусовой и т.п.) необходимо ее преобразование в электрические сигналы. Необходимо также согласование, как правило\*\*, с более медленными по сравнению с электрическими другими (в том числе химическими) процессами в организме и внешней среде.

Все ли цепи при этом модифицируются? Конечно же нет. Прежде всего, нейронные цепи, ответственные за жизненно важные функции организма, а также хранящие в длительной памяти информацию на всю жизнь не должны подвергаться осязаемым модификациям. Модификация некоторых из них

---

\* Согласно современным данным аксоны могут стимулировать эффекты “памяти” [35] в нейронах.

\*\* Исключение из отмеченных ранее очевидно составляют оптические сигналы.

может привести просто к трагическим последствиям. В то же время нейронные цепи, используемые при обработке сенсорной информации, в мыслительной деятельности, находящиеся в основном в коре головного мозга, могут и должны обладать возможностью такой модификации, хотя бы ввиду огромного разнообразия окружающего нас мира и вследствие отмеченных ранее ограничений. Этот взгляд очень хорошо согласуется с концепцией Н.П. Бехтеревой “о существовании жестких и гибких звеньев различного функционального значения в нейрофизиологических системах обеспечения психической деятельности” [19]. Под “жесткими и гибкими звеньями” здесь понимаются “популяции нейронов”. Необходимо, однако, заметить, что “гибкие звенья” могут реализовываться не обязательно за счет модификации нейронных цепей, но и за счет многообразных возможностей в поведении самих нелинейных электрических цепей первого типа (см. далее).

Таким образом, *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. Близкими аналогами в микроэлектронике (см., например, [42]) являются ИС памяти, а именно: постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и программируемые ПЗУ, соответственно. Итак, *память*. В связи с этим опять уместно вспомнить слова великого физиолога – Ивана Михайловича Сеченова, а именно: “Память – сила, которая лежит в основе всего психического развития. Не будь в самом деле этой силы ... психическое развитие было бы невозможностью” [1]. Сразу же замечу, что и многие другие исследователи мозга отмечают большую важность для его работы памяти (см., например, [36,38,43]), однако никто не рассматривал ее в рамках предложенной последовательной электронной интерпретации. Как свидетельствуют результаты современных экспериментальных исследований, три структуры мозга играют ключевую роль для памяти, а именно [17]: кора, мозжечок и гиппокамп, “хотя следует подчеркнуть, что функции памяти распределены по всему мозгу”.

---

\* Не следует, конечно же, забывать о других составляющих мозга, а именно [41]: кровеносной системе, нейроглиальных клетках, которых больше, чем нейронов, и т.п., обеспечивающих важные вспомогательные функции (доставки требуемых веществ, питание и др.). Здесь мозг рассматривается как устройство хранения и обработки информации, мыслительной деятельности.

После этого мы готовы к рассмотрению того как приблизительно функционирует мозг. Так как мозг является полифункциональным устройством опишем принципы его работы в некоторых различающихся режимах. Прежде всего, это связано с тем, что многие процессы происходят одновременно или параллельно, например, обработка поступающей информации, воспоминания, мышление, управление различными системами организма, причем некоторые осознанно (с участием определенных структур мозга, по-видимому, гиппокампа [16]), а другие – нет (без их участия). Множество режимов работы свойственно и для различных систем мозга, а точнее формирующих их нейронных цепей. Более того, полифункциональностью характеризуются не только нейронные популяции, но и сами нейроны [19]. В этом, с одной стороны, огромная сложность анализа, а с другой, – впечатляющая гибкость в работе мозга.

Можно условно выделить 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 психические 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.

К первому типу режимов относится обработка сенсорной информации. Уже отмечалось, что после получения информации сенсорными рецепторами она конвертируется в электрические сигналы с различными *преобразованиями*\* (декомпозиция и т.п.), т.е. происходит *кодирование* сигнала в результате его иерархической обработки. Далее происходит прохождение электрического сигнала по нейронным цепям памяти в различных участках мозга (в основном в коре головного мозга). Ввиду нелинейности цепей и их такого диффузионного расположения в мозге возможна как дивергенция, так и конвергенция в распространении электрического сигнала. В конечном итоге поиск осуществляется в результате операции *сравнения* поступившего кодированного

---

\* Этот термин достаточно общий и может использоваться для описания почти всего, что происходит в мозге с электрическими сигналами. Поэтому ранее выделены и далее употребляются более конкретные понятия.

электрического сигнала с информацией, закодированной цепями. В случае совпадения с определенной степенью точности происходит как бы резонанс, и объект опознан. А если нет? Или нет требуемого совпадения? В этом случае принимается *команда к действию*, в частности, здесь\* о необходимости *модификации нейронных цепей* в соответствующих участках, т.е. новое дополнительное кодирование в цепях. Замечу, что отличие может быть мало существенным, так как совпадают наиболее важные признаки. И в этом случае объект также опознан, но может быть все же дана команда на модификацию цепей. В результате такой иерархически-диффузной обработки электрического (внешнего) сигнала в мозге и реализуется массовый параллелизм при обработке поступающей сенсорной информации, например при распознавании образов. Так как электрические сигналы распространяются достаточно быстро, то сама процедура параллелизма в обработке информации характеризуется очень высокой эффективностью. Последнее отмечалось многими исследователями мозга.

Ко второму типу режимов работы мозга относятся воспоминания. Согласно принятой интерпретации это прохождение электрического сигнала инициированного самим мозгом (поэтому внутренний режим) по соответствующим (определенным в пространстве и во времени) цепям памяти, в которых зафиксированы данные события, т.е. происходит *декодирование* (внутреннего) сигнала. Тут уместно напомнить, что искусственным электрическим раздражением мозга (определенных участков) можно вызвать не только воспоминания, но и другие психические реакции (см. ранее), что удавалось получить многим исследователям даже с использованием достаточно грубой электродной техники (см. далее).

Подобное воспоминаниям происходит и при мышлении, однако, как правило, с не столь жесткими связями, как в первом случае для строго определенных событий. Поэтому многие акты мыслительной деятельности могут быть также отнесены ко второму типу режимов работы мозга, т.е. внутреннему. Природа и здесь продемонстрировала свою гениальность, так как и эта деятельность характеризуется очень высокой эффективностью и экономичностью. Итак, *мысль – это декодирование (внутреннее воспроизведение) электрического сигнала (сигналов) инициированного самим мозгом, проходящим по различным*

---

\* Команда к действию может быть подана и после опознания объекта, например, к движению и т.п.

нейронным цепям мозга соответствующей пространственно-временной конфигурации. Следовательно, мысль – это своеобразный обратный процесс по отношению к обработке поступающей информации (прямой процесс) и иницируемый, 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. А это означает, что мы в основном мыслим “шаблонами”, закодированными в имеющихся электрических цепях первого типа. И в этом огромная эффективность и экономичность в работе мозга. Прохождение электрического (достаточно быстродействующего\*) сигнала может происходить как бы “скачками” между различными цепями, т.е. не столь организованным (иногда достаточно хаотическим) образом, как при воспоминаниях. Потрясающее многообразие мыслительной деятельности даже в этом случае может реализовываться вследствие колоссального числа таких цепей.

Почему же именно мыслительная деятельность вызывает так много дискуссий и споров в литературе? Кроме целесообразности использования приведенной электронной интерпретации в работе мозга, автор также видит несколько объективных причин. Во-первых, внутреннее воспроизведение при мыслительной деятельности происходит закодированной информации, т.е., строго говоря, лишь компактно отражающей полученную ранее более полную информацию о действительности и преобразованную. Во-вторых, необходимо учитывать отмеченное ранее постоянное “наслоение” информации. В результате создается иллюзия чего-то необычного, таинственного, непостижимого.

Очень интересным остается вопрос о возможности модификации нейронных цепей в процессе мыслительной деятельности. Если отрицать такую возможность, то мы мыслим только “шаблонами” или “стереотипами”. Это, кстати, согласуется с информацией многих исследователей мозга о том, что он часто додумывает или подгоняет свое решение, видение под уже имеющееся\*\* (см., например, [16,17,31,44]). Хочется, однако, верить, что в процессе

---

\* В этом плане важна информация Н.П. Бехтеревой и ее коллег о соизмеримости по порядку величин длительности импульсной активности нейронов с временными характеристиками мыслительной деятельности [19].

\*\* По-видимому, это более типично для пожилых людей, так как возможности модификаций с возрастом ухудшаются.

творческой работы, хотя бы в некоторых случаях, может происходить определенная модификация (не обязательно возникновение новых связей, см. ранее) цепей, как при реальном внешнем воздействии, научении<sup>\*</sup>. Здесь уместно также отметить большие возможности в работе и самих нелинейных электрических цепей первого типа без модификации, например, при подаче различных входных сигналов на нейронные цепи.

В то же время из психологии известно, что творческий процесс может быть представлен в виде четырех этапов [17]: 1) подготовка; 2) инкубация; 3) инсайт (просветление); 4) проверка. Вполне возможно, что в период инкубации как раз и происходит модификация нейронных цепей или перебор по ним, хотя последний, по крайней мере в ряде случаев, более быстрый процесс. Когда формируется необходимый набор нейронных цепей, который отражает решение изучаемой проблемы, и происходит инсайт (озарение) в результате прохождения по нему электрического сигнала.

Таким образом, обычно *мышление – внутреннее восприятие человеком закодированной в самом же мозге информации.*

Важный смешанный режим работы мозга – управление различных систем жизнедеятельности организма с помощью цепей фиксированного вида при поступлении внешней информации. Так как многие рассмотренные режимы могут реализовываться параллельно, то, строго говоря, типичный режим функционирования мозга – смешанный<sup>\*\*</sup>. Например, мыслительная деятельность часто происходит при поступлении внешней информации, т. е. в смешанном режиме. Ясно, что в этом случае модификация нейронных цепей возможна. Отмечу также взаимодействие или взаимовлияние различных специфических режимов работы мозга.

Необходимо подчеркнуть, что нормально функционирующий развитый мозг, в котором происходят соответствующие процессы консолидации на основе электрических и химических процессов, – необходимое, но не достаточное условие для наличия сознания. Как пишут многие исследователи, необходимо также обязательно взаимодействие с внешней средой (см., например, [7,8,14,16]), т. е. необходимо пройти нормальный цикл развития в результате

---

<sup>\*</sup> Интересно заметить, что в творческом процессе многое выглядит именно как своеобразное самонаучение, т.е. как бы часто без внешнего воздействия.

<sup>\*\*</sup> В этом плане внутренний режим работы мозга – удобная идеализация (см. также далее).

этого взаимодействия. Узловые моменты такого взаимодействия были кратко описаны в рамках электронной интерпретации работы мозга.

Здесь уместно рассмотреть вопрос о сложности набора нейронных цепей мозга. Прежде всего, впечатляют цифры [11,12,28,45]: число нервных клеток  $10^{10} - 10^{12}$ ; число синапсов  $10^{14} - 10^{15}$ ; еще большее число ионных каналов и молекул\*, являющихся ключевыми структурами. Более того, согласно современным данным число различных типов нервных клеток “несомненно, больше сотни, а может быть, и больше тысячи” [11]; весьма разнообразными могут быть и ионные каналы [12]. Морфологические данные [47] свидетельствуют, что и синапсы даже одного типа достаточно сильно различаются. Возможно и огромное число связей нейрона с другими нейронами, в частности от 1 до 10 тысяч синаптических связей и более [31]. Сюда же следует добавить отмеченные ранее многочисленные индивидуальные особенности нейронных цепей. Так, данные электрофизиологии [48] свидетельствуют, что даже аксоны и дендриты не могут быть отнесены к простым пассивным элементам электрической цепи, потому что идет регенерация потенциала действия, возникновение спайков и т. п.

Таким образом, строго говоря, почти нет одинаковых элементов, составляющих нейронные цепи. Исключением, по-видимому, являются лишь однотипные ионные каналы, формируемые соответствующими молекулярными структурами (см. ранее).

В результате, сложность набора этих своеобразных электрических цепей первого типа просто потрясает\*\*. В связи с этим не случайны огромные потенциальные возможности мозга в запоминании информации. Так, старые оценки объемов памяти в  $10^{15} - 10^{16}$  битов [3] были, по-видимому, излишне оптимистическими по сравнению с современными –  $10^9 - 10^{12}$  битов [16]. И тем не менее возможности, конечно же, впечатляют.

Результатом всего этого является большое разнообразие в поведении нелинейных электрических цепей первого типа. Во-первых, уже отмечалось, что они характеризуются динамическими режимами работы. Так, рядом специалистов подчеркивается разнообразие нервных кодов мозга и передачи

---

\* Около  $10^{22}$  на  $1 \text{ см}^3$  [46].

\*\* Поэтому, как мне кажется, вполне понятен достаточно сложный вопрос о доступности информации [16].

сообщений в импульсной форме [19,32,49]. Во-вторых, многие виды психической, в частности, мыслительной деятельности связываются с функционированием большого числа (набора) нейронных ансамблей (цепей). По оценкам Н.П. Бехтеревой и ее коллег “число таких звеньев<sup>\*</sup>, по-видимому, никак не меньше тысячи или скорее десятков тысяч зон” [19]. Поэтому важны могут быть “коллективные” или “кооперативные эффекты” [19]. С ними, в частности, можно связать и известную “голографическую теорию” функционирования мозга [49]. Интересно заметить, что подобные коллективные эффекты бывают важны и в сложных ультрабольших ИС (УБИС) (см., например, [50]), т. е. в электрических цепях второго типа. В результате, например, при распознавании образов действие нейронных цепей часто носит как бы резонансный характер (см. ранее). Простейшим примером является функционирование клеток полосатой коры при обработке оптических сигналов. Они как раз наиболее сильно и реагируют на определенный стимул [12].

В этом плане интерес представляют результаты моделирования простейших нейронных сетей<sup>\*\*</sup> монографии [33]. Оказалось, что для одной сети возможно огромное многообразие в поведении даже в установившихся колебательных состояниях, причем для этого не обязательна модификация синаптических связей. Так что даже одна сеть без модификации может хранить огромное количество образов. В этой работе для кольцевых нейронных сетей (один из возможных вариантов) с достаточно серьезными упрощениями было проиллюстрировано в результате качественного анализа с использованием асимптотического исследования разнообразие возможных режимов их функционирования, многие из которых имеют биологические аналоги. Была также продемонстрирована возможность кратковременной памяти на кольцевых и локальных нейронных сетях. Автор считает эти результаты важными, так как они иллюстрируют один из возможных вариантов функционирования электрических цепей мозга при обработке информации, например, при распознавании образов.

Ввиду нелинейности и регулярной модификации ряда электрических цепей первого типа в них могут реализовываться и вероятностные механизмы поведения в зависимости от сигнала, а точнее скорее создающие иллюзию

---

<sup>\*</sup> Имеется ввиду “жестких и гибких звеньев мозговых систем” [19].

<sup>\*\*</sup> Автор умышленно здесь использует термин “нейронные сети”, характерный для работ по искусственному интеллекту и используемый в цитируемой монографии.

такого поведения. Здесь уместно вспомнить слова лауреата Нобелевской премии Д. Хьюбеля [11]: "... я подозреваю, что те, кто говорит о случайных нейронных сетях, не утруждали себя ознакомлением с нейроанатомией". Думаю, что точнее здесь говорить о "псевдослучайном поведении клеток мозга" [51]. В этом случае, по-видимому, труднопредсказуемо меняется состав обрабатывающих, воспроизводящих нейронных цепей, т.е. меняется соответствующий состав электрической цепи из имеющихся элементов. В результате можно образно сказать, что обработка информации идет как бы "вероятностным нейронным ансамблем" [29]. Но не всегда. Важны и фиксированные цепи (см. ранее).

*Таким образом, электрические цепи первого типа могут демонстрировать огромное разнообразие в поведении в зависимости как от входящих, так и проходящих по ним сигналов.*

Зачем же такое богатство в поведении? Ответ предельно прост – гигантские объемы входной информации. И несмотря на указанное выше, все же ограниченные возможности мозга. Известно, что мозг функционирует и обрабатывает огромные потоки информации, причем часто работает с неполной информацией и знаниями. При этом решаются и задачи, которые не имеют однозначного решения. С детства человек учится работать в таких сложных условиях и более или менее успешно справляется с решением подобных задач (большинство нормальных людей). Прежде всего удастся это на основе существенных объемов закодированной в мозге информации и достаточно оперативной при этом обработке поступающей и имеющейся информации с использованием электрических сигналов. Экономичность же ее сохранения (и одновременно эффективность при обработке) достигается вследствие многочисленного иерархического кодирования информации в различных системах мозга. Именно гигантские объемы входной информации и являются своеобразным "двигателем" (инициатором) эволюции.

В связи с такими потоками информации автор считает, что сон имеет, прежде всего, физиологическое значение [16]. С одной стороны, мозгу нужен просто отдых (определенное восстановление возможностей), а с другой, по-видимому, идет различных видов обработка (систематизация) информации (сжатие, сортировка, закрепление и т.п. [16,38]). Что же касается сновидений, то этот

(внутренний\*) режим работы мозга, скорее всего, связан с релаксационными процессами. Во всяком случае, то что происходит свидетельствует о более хаотическом прохождении электрического сигнала по нейронным цепям мозга, т.е. не управляемом (по крайней мере менее управляемом\*\*) по сравнению с мышлением (см. выше). Следовательно, сновидения – “хаотический режим” работы мозга\*\*\*. Интересен также вопрос о модификации цепей во сне. Если предположить, что идет определенная реструктуризация нейронных цепей, а времени для этого достаточно, то она также должна иметь место.

---

\* Он, по-видимому, наиболее близок к “чисто” внутреннему режиму работы мозга.

\*\* Об этом свидетельствуют и данные нейрофизиологии сна [10].

\*\*\* Заметим, что некоторые мыслительные акты могут все же носить очень близкий, “псевдохаотический” характер. Об этом, в частности, также свидетельствуют известные данные о возможности творческого процесса во сне [38].

### **3. Достаточно ли для описания работы мозга, включая сознание, мысль, другие психические функции, квантовой механики?**

Прежде всего, отмечу, что квантовая механика здесь будет пониматься в широком смысле. Для пояснения этого приведу слова лауреата Нобелевской премии по физике Стивена Вайнберга, а именно [52]: “Все затейливые математические теории, которыми в последние годы занимаются физики, – квантовые теории поля, калибровочные теории, теории суперструн – все они формулируются в рамках квантовой механики”. Таким образом, имеется ввиду современный уровень квантовой физики, т.е. автор придерживается в данной работе точки зрения этого выдающегося американского физика.

До попытки ответить на поставленный вопрос сделаю несколько замечаний.

Во-первых, о полноте квантовой механики. Читая лекции студентам по квантовой механике с 1995 года, автор отмечает, что в легендарном споре о ее полноте между двумя великими физиками – Альбертом Эйнштейном и Нильсом Бором – правы обе стороны, но каждая по-своему\*, т.е. “у медали – две стороны”. Так, Альберт Эйнштейн, оспаривая полноту квантовой механики, был прав в общеполитическом смысле. Математические модели\*\* квантовой механики являются идеализациями, а, следовательно, не могут полностью соответствовать более или менее сложному изучаемому объекту. Автор в статье [23] назвал эту проблему – проблемой “первого шага” (начало идеализации), и, по-видимому, она в общем случае неустранима в науке, основанной на математических моделях. Именно эта проблема может и будет являться “фундаментальной основой бесконечных спекуляций” в стиле: “В работе мозга мы чего-то не понимаем. Здесь есть что-то таинственное”.

*Таким образом, точное описание работы мозга с помощью квантовой механики современного уровня развития невозможно.*

В чем же прав Нильс Бор и его многочисленные последователи? Они правы фактически в том, что возможные значения, включая результаты измерений, физических величин, описывающих поведение микрочастиц и их ансамблей,

---

\* Замечу, что излагаемая далее точка зрения, в сущности, сформулирована с применением расширенного толкования концепции дополнительности Нильса Бора.

\*\* Автор здесь пользуется принятым определением данного термина в русскоязычной литературе, см. Большую Советскую Энциклопедию, Физическую энциклопедию, Большую энциклопедию.

могут быть предсказаны с использованием формализма квантовой механики с достаточно высокой степенью точности, если такие измерения возможны в принципе<sup>\*</sup>. Во всяком случае до сих пор очень многочисленные поиски каких-либо экспериментальных опровержений квантовой механики, осуществляемые как в прошлом [53], так и в более современных исследованиях (см., например, [54,55]), не увенчались успехом. “Дело не только в том, что квантовая механика является основой всех наших представлений о материи и разных взаимодействиях и прошла невиданно жесткую экспериментальную проверку; более важно то, что никому не удалось придумать способ как-нибудь изменить квантовую механику, который сохранил бы все ее достоинства, но не привел бы к логическим противоречиям” [52]. Эта принципиально важная логическая завершенность квантовой механики была впервые убедительно показана Дж. фон Нейманом в ставшей легендарной монографии [56].

Во-вторых, о возможностях описания живых организмов с помощью физики. Хотя дискуссии на эту тему ведутся очень давно (см., например, [7]), Н. Бор и Э. Шредингер были первыми среди основателей квантовой механики, которые подняли этот вопрос в отношении “новой физики”. Вопрос естественным образом перешел и на функционирование мозга. Более того, выдающийся советский и российский физик, лауреат Нобелевской премии Виталий Лазаревич Гинзбург “вопрос о возможности объяснить происхождение жизни и мышления на основе одной физики” отнес к одной из “трех “великих” проблем современной физики” [57].

В целом, мнения ученых по данным вопросам и им подобным разделились. Так, только относительно мышления в настоящее время существует широкий спектр взглядов, теорий (см., например, [15–17,40,58]). Однако, несмотря на это, все же выделяются две крайние, диаметрально противоположные точки зрения на рассматриваемую проблему. Согласно первой – биология принципиально несводима к физике. Здесь уместно заметить, что в настоящее время в психологии многими специалистами признается хотя бы следующее [16]: “Нет более важного принципа для современной психологии ..., чем этот: *Все психологическое является одновременно и биологическим*”<sup>\*\*</sup>. Согласно второй точке зрения – биологические явления могут быть в конечном итоге объяснены

---

<sup>\*</sup> Вспомним, что некоторые величины согласно квантовой механике не могут быть одновременно измерены.

<sup>\*\*</sup> Выделено автором этой блестящей книги.

только с помощью физики (редукционизм). К сожалению, в литературе часто встречается “примитивный взгляд” на редукционизм. Убедительная критика этой опасной точки зрения проведена в статье выдающегося советского и российского биофизика М. В. Волькенштейна, а именно [59]: “Редукционизм, физикализация, математизация биологии воспринимается догматиками как зловердная ересь. В действительности понятие о редукционизме здесь полностью лишено содержания. Речь идет не о редукционизме, но об интегратизме естествознания. Наука изучает целостный материальный мир, его многоуровневую систему\*. Различные уровни исследования представлены во всех областях естествознания. Глубинный уровень – всегда физический, и именно это положение определяет содержательность и значимость специфических уровней исследования в химии и биологии и перспективы их дальнейшего развития”. Отмечу и интересное продолжение темы жизни с точки зрения физики на современном уровне ее развития, проведенное в статье [60], а также серьезный исторический экскурс в этом же направлении статьи [61].

Второй точке зрения в отношении сознания, мышления придерживаются многие физики, правда, иногда с некоторыми оговорками. Среди наиболее значимых работ последнего времени отмечу статьи и книги профессоров М. Б. Менского [62–65] и Р. Пенроуза [66,67] и многочисленные последующие обсуждения прежде всего этих и других работ [58,68]. Весьма интересной в этом плане является классификация Р. Пенроуза к точкам “зрения на отношения между процессами сознательного мышления и способностью к вычислениям” (см. табл. 3.1 книги [58]). При этом было выделено четыре подхода (А–D). Сам же Р. Пенроуз считает, что современной физике чего-то не хватает [66,67] (подход С). Позиция автора ближе к подходу В, а именно: “Сознание является лишь одной из характеристик особенностей физической деятельности мозга. Как и любая другая физическая деятельность, сознание может моделироваться вычислительными операциями, но такое моделирование не является, строго говоря, самим сознанием” [58].

Итак, точка зрения автора формулируется следующим образом. *С одной стороны, психические функции мозга не могут быть описаны точно с помощью квантовой механики в принципе. С другой стороны, функционирование мозга может быть в принципе описано с высокой степенью*

---

\* Вопрос о многоуровневости для нас будет иметь важное значение и в дальнейшем.

*точности (достаточной) с применением формализма квантовой механики на современном уровне ее развития.* Последнее утверждение формулируется лишь как *гипотеза о достаточности квантовой механики* (в качестве основы описания работы мозга, см. далее) в явном виде, которая не может быть доказана в настоящее время. Подчеркну, что и эта гипотеза сформулирована с применением расширенного толкования концепции дополнителности Н. Бора.

Здесь приведу лишь некоторые аргументы в пользу данной гипотезы.

Во-первых, квантовая механика является надежной фундаментальной основой исследования физических свойств самых разнообразных объектов материального мира, а именно: элементарных частиц, атомов, молекул, различных систем данных частиц. Принципиально важно отметить, что при этом достигается хорошее согласование с экспериментом. Уже подчеркивалось, что до сих пор не удалось получить каких-либо экспериментальных опровержений квантовой механики. В то же время мозг относится к материальным системам, состоящим из указанных выше частиц.

Во-вторых, глубинным уровнем описания основных процессов, определяющих функционирование мозга, т.е. электрических и химических (см. ранее), является квантовая механика. Что же касается химических процессов, то ограничусь лишь словами дважды лауреата Нобелевской премии, в том числе по химии, Лайнуса Полинга [52]: “нет ни одного раздела химии, который не зависел бы в своих фундаментальных основах от квантовых принципов”.

В-третьих, глубинной основой современной физики твердого тела, электроники, включая ИС микро- и нанoeлектроники, является квантовая механика. Во всяком случае специалисты в этом несколько не сомневаются. Более того, такой детализации, как правило, и не надо. Во всяком случае для того, чтобы разработать компьютер, телевизор, ИС и, естественно, понять принципы, важные моменты их функционирования используются гораздо более простые закономерности, которые, однако, выводятся из квантовой механики.

В-четвертых, и, наверное, самое главное. Согласно данным современной нейрофизиологии и нейропсихологии мозг лишь приближенно отражает действительность и обрабатывает поступающую информацию (см. также ранее). Например, хорошо известно, что мы не воспринимаем оптические сигналы в некотором диапазоне длин волн (см., например, [11]). В связи с этим

возникает элементарный вопрос: “А надо ли описывать такое устройство, т.е. мозг, точно?” Ответ очевиден – нет!

*Таким образом, квантовой механики вполне достаточно для описания работы мозга.*

Библиотека БГУИР

#### 4. Как далее исследовать мозг?

Прежде чем отвечать на этот вопрос, целесообразно сделать замечания, связанные с необходимостью очень вдумчивой и сверхакуратной работы с квантовой механикой – самой мощной теорией когда-либо созданной Человеком. Ведь тут ошибались такие великие физики, как А. Эйнштейн и Э. Шредингер, т.е. ученые, относящиеся к ее творцам. Так как эта тема неоднократно и уже давно рассматривалась на страницах журнала “Успехи физических наук” (см., например, [69–71]), то здесь дам лишь краткие пояснения, полезные нам в дальнейшем.

Так, очень часто, кроме некоторых постулатов квантовой механики, забывается, что она предназначена для описания поведения закрытых систем, а также собственно предмет ее изучения, а именно [72]: “... предметом рассмотрения квантовой механики является движение микрочастиц”. Имеется ввиду не только непосредственно сами микрочастицы, но и их ансамбли [72].

Требование закрытости системы может перерасти в достаточно серьезную техническую проблему. Ведь изучаемую систему необходимо дополнить до закрытой системы, а это, как справедливо отмечается в [73], может быть “остаток Вселенной”, если последнюю считать закрытой системой, что, кстати, тоже проблематично. Итак, любое редуцированное описание изучаемой системы с помощью квантовой механики, строго говоря, приближенное, хотя бы по этой причине (см. также ранее). Почему же возникла эта проблема? С точки зрения автора она является следствием сути, если хотите “соли”, квантовой механики, которая заключается в простом и абсолютно точном утверждении: “Все\* взаимодействует со всем!” Поэтому при работе с квантовой механикой мы вынуждены вводить явно или неявно приближения (следующий шаг идеализации) с целью возможности рассмотрения более простых изучаемых систем.

Забычивость о предмете квантовой механики приводит некоторых авторов к утверждению, что она “не работает” для макроскопических тел. Действительно, “в лоб” и некорректно может не работать. Отсюда в основном и появляются различного рода парадоксы типа кота Шредингера. В связи с этим отмечу лишь два факта, известных из учебников, а именно:

---

\* Имеются ввиду микрочастицы и их ансамбли.

1). Уравнения классической механики получаются из уравнений квантовой механики в определенных условиях (предположениях), которые, как правило, выполняются для макроскопических тел (см., например, [72]). Это значит, что эти условия (предположения) допустимы при переходе от строгой (квантовая механика) модели к более простой (классическая механика);

2). Вся физика твердого тела в сущности построена исходя из законов квантовой механики в определенных предположениях (см., например, [74]), справедливость которых традиционно устанавливается после сравнения соответствующей теории и эксперимента, т.е. фактически после проверки допустимости того или иного упрощающего перехода.

Таким образом, и в том и в другом случаях квантовая механика “работает”, однако, ее использование очень сложно, а часто просто технически не осуществимо (см. далее), т.е. она слишком детальна во многих случаях. Необходимо, однако, все же подчеркнуть, что эта проблема технического\*, а не принципиального характера. Поэтому целесообразнее в отмеченных и им подобных случаях применять более простые и менее адекватные следующие из квантовой механики приближенные модели. Следовательно, использование квантовой механики здесь в качестве физико-математической основы, по крайней мере, указанных двух дисциплин более чем достаточно.

Показательна в этом плане схема корректного применения квантовой механики в качестве основы при построении зонной теории твердых тел. Очень кратко она заключается в следующем (см., например, [75]). Кристалл, являющийся системой легких (электроны) и тяжелых (ядра) микрочастиц, описывается волновой функцией, зависящей от их координат. Далее записывается гамильтониан этой системы, учитывающий доминирующие взаимодействия. Соответствующее многочастичное стационарное уравнение Шредингера (даже без учета влияния спинов электронов и ядер) содержит  $3(Z+1)N$  координат частиц, где  $N$  – число атомов в кристалле,  $Z$  – порядковый номер элемента в таблице Менделеева. Если учесть, что согласно оценкам в  $1 \text{ см}^3$  находится около  $5 \cdot 10^{22}$  атомов, то для  $Z=14$  число переменных в этом случае  $\sim 2 \cdot 10^{24}$  [75], т.е. фантастическое. Ясно, что даже после, как минимум, двух шагов идеализации (см. выше) получаемое уравнение Шредингера решить

---

\* Она, конечно же, отличается от технической проблемы второго шага идеализации (см. ранее).

невозможно, по крайней мере на современном этапе развития вычислительной техники, а также в обозримом будущем. Поэтому далее вводятся достаточно серьезные приближения (адиабатическое Борна–Оппенгеймера, одноэлектронное). В результате получается упрощенное одноэлектронное уравнение *вида* уравнения Шредингера для огибающей волновой функции. Отмечу, что для этой функции принцип суперпозиции уже может не выполняться. Прodelайте подобное последовательное рассмотрение для системы в парадоксе кота Шредингера (опишите кота, как ансамбль микрочастиц, и т.д.), выведите, если сможете, уравнение, позволяющее получить согласование с экспериментом, и убедитесь в том, что кот будет либо жив, либо мертв в зависимости от целостности ампулы с ядом\*.

Целесообразно также сделать замечание о редукции волновой функции. Это, действительно, очень удобный феноменологический прием, без которого в квантовой механике можно вполне обойтись (см., например, [76,77]). Он удобен при рассмотрении измерений, так как может значительно упростить описание изучаемой системы в рамках составной (изучаемая система и измерительный прибор). Хотите более строго, пожалуйста, переходите к описанию на основе статистического оператора (матрицы плотности) или более сложной системы изначально для волновой функции. Важно отметить, что корректно этот вопрос впервые рассмотрел Дж. фон Нейман (см. его монографию [56], в частности главу V).

Несмотря на принятую вторую гипотезу о достаточности, строгое использование квантовой механики для описания работы мозга, как и для твердого тела (см. ранее), к сожалению, практически невозможно. Причина – точно такая же. В частности, число взаимодействующих молекул в  $1 \text{ см}^3$  мозга имеет приблизительно тот же порядок, что и атомов в кристалле, т.е. около  $10^{22}$  (см. ранее). Подобные по сложности задачи в математике называются труднорешаемыми класса NP. В связи с изложенным принимаем третью гипотезу: *строгое математическое описание работы мозга с помощью квантовой механики относится к труднорешаемым задачам класса NP*. Эта гипотеза, к сожалению, не может быть доказана\*\* на настоящий момент времени.

---

\* Замечу, что в литературе обычно дается другое разъяснение парадокса.

\*\* Это, кстати, характерно для подобного рода задач (см., например, [78]).

Таким образом, *кроме двух шагов идеализации* ( I-й шаг – неустранимый; II-й шаг – технический, см. ранее) *последующие идеализации, причем существенные, при теоретическом исследовании функционирования мозга на основе квантовой механики являются фактически вынужденными*. И дело даже не только в том, что, к сожалению, строгое рассмотрение работы мозга невозможно на уровне молекул. Оно практически неосуществимо и на гораздо более простом уровне взаимодействующих нейронов ввиду, прежде всего, их колоссального числа (см. ранее).

Отмечу также еще две очень “тяжелые” проблемы. Во-первых, в режиме при внешнем воздействии (см. выше) необходимо исследовать взаимодействия в сложной составной системе, а именно: “объект – сенсорная система – мозг”. Эта проблема начала рассматриваться еще классиками (В. Гейзенбергом, Н. Бором, Дж. фон Нейманом и др.) и представляет собой исключительно сложную проблему квантовой механики [62].

Во-вторых, в соответствии с принятой интерпретацией мозг является непрым набором нейронных нелинейных электрических цепей, так как многие из них могут модифицироваться в процессе функционирования. Замечу, что расчет даже элементарных не изменяющихся нелинейных электрических цепей достаточно непрост [79,80].

Как же анализировать такой высочайшей сложности системы и возможно или это? Признанный подход – исследование сложных систем по частям (декомпозиция). Методы декомпозиции эффективно используются при решении самых разнообразных задач (электродинамики [81], квантовой механики, исследования многоатомных молекул и др. [82]), включая анализ нелинейных электрических цепей [82], интегральных схем разной степени интеграции [83–86], что особенно важно для нас.

Так, в настоящее время с успехом разрабатываются и изготавливаются УБИС с числом элементов на кристалле более  $10^9$ . Хотя эти цифры пока еще далеки даже от числа нейронов в мозге человека, как уже отмечалось, ИС является наиболее близким искусственным аналогом для него. Более того, задачу моделирования УБИС можно также отнести к труднорешаемым класса NP. Здесь уместно отметить, что у специалистов в области микро- и нанoeлектроники нет сомнений в том, что разработка ИС еще более высокой

степени интеграции по сравнению с отмеченной будет успешно продолжаться близко к закону Мура и в дальнейшем [87].

Таким образом, приведенная информация позволяет сделать вывод о том, что у *Человека уже есть положительный многолетний опыт решения подобных, хотя и не столь сложных относительно рассматриваемой, задач в области микро- и нанoeлектроники. Это, в частности, исследование\* УБИС,*

В связи с этим здесь уместно кратко описать хотя бы принципы моделирования (автоматизированного проектирования) современных ИС (для более подробной информации см., например, [83–87]). При декомпозиции описания ИС используются разные уровни (степень) детализации, причем на каждом из них может применяться иерархия моделей. Учитывая, что задача относится к труднорешаемым класса NP, то такое разбиение не может быть однозначным. Поэтому невозможно создание единой универсальной методологии моделирования (автоматизированного проектирования), по крайней мере, ИС высокой степени интеграции, в частности УБИС, которая могла бы быть успешно реализована на современных ЭВМ. Результатом этого является большое разнообразие методологий, а, следовательно, неоднозначность возможной структуры их систем автоматизированного проектирования. И тем не менее выделяются следующие основные уровни проектирования (моделирования) ИС [84,86], приведенные в табл. 1. Нумерация проведена, начиная с нижних иерархических уровней (наибольшая степень детализации). Для сравнения в табл. 1 также указаны основные уровни исследования мозга (фактически специальные дисциплины).

Таким образом, невозможность строгого решения задачи привела к тому, что *моделирование современных ИС является иерархическим в целом, т.е. между уровнями (многоуровневое), и, в частности, т.е. в рамках одного уровня обычно используется иерархия моделей. При этом интенсивно применяются самые различные и современные экспериментальные методы и оборудование.* Причин для этого много. Важнейшие – задание исходных данных и компенсация “потерь” в адекватности моделирования вследствие изложенного ранее, а также погрешностей моделей и др. Именно подобный комплексный подход, с точки зрения автора, и наиболее перспективен для дальнейшего исследования

---

\* Тут интересно заметить, что УБИС все же еще и изготавливаются Человеком в отличие от мозга. В этом плане задача для мозга, по крайней мере, на данном этапе проще.

## Уровни рассмотрения объектов

Мозг	Современные ИС
2. Нейропсихологический	6. Архитектурный
	5. Конструкторско-топологический
	4. Функционально-логический
	3. Схемотехнический
	2. Элементный
1. Нейрофизиологический	1. Технологический

мозга, т.е. электрических цепей первого типа, несмотря на все отмеченные ранее серьезные проблемы.

Однако вернемся к табл. 1. Как из нее следует, рассмотрение УБИС осуществляется на большем числе иерархических уровней. Причем ключевым является схемотехническое моделирование, т.е. по существу на уровне электрических цепей, и это важно (см. далее). Исследование мозга\* проводится фактически только на двух уровнях, несмотря на то, что объект гораздо сложнее. Следовательно, деление в этом случае является достаточно грубым, что, кстати, отмечалось рядом исследователей мозга.

Результатом такого грубого деления на два уровня и является итог наших исследований мозга на сегодняшний день, который очень образно и красиво выражает следующая цитата [31]: “Все, что мы можем сделать сегодня, – это установить корреляцию: паттерн X соотносится с поведенческой моделью Y”. В этом же плане очень показательна оценка одного из крупных специалистов когнитивной психологии Р. Солсо по поводу стиля работы в данной области, а именно [17]: “Многие когнитивные психологи невольно совершают подобные скачки от эмпирических данных к гипотетическим построениям, а некоторые,

\* Имеются в виду, конечно же, только специальные дисциплины.

вполне сознательно и по доброй воле, делают на основании имеющихся данных различные выводы (так и появляются самые разнообразные модели)”.

И тем не менее автор не столь пессимистически настроен. В действительности, в нейрофизиологии, нейропсихологии и психологии в целом получены значительные и замечательные результаты\*, которые могут и должны быть использованы в рамках комплексного иерархического подхода исследования мозга. Конечно же, уровней должно быть больше. И тут, вообще говоря, много возможных вариантов декомпозиции, так как задача относится к труднорешаемым класса NP. Отмечу, что могут быть различными даже принципы разбиения, например, исходя из взглядов на работу мозга.

Так, в рамках нейробиологии очень удачным, как мне кажется, является разбиение на уровни организации нервной системы, приведенное в учебнике выдающегося американского нейробиолога Г. М. Шеперда (рис. 1.6, [88]). Интересно заметить, что, если отбросить тип носителей заряда на рис. 1, то и здесь число уровней равно шести (сравни с табл. 1, правая колонка). Допустимы, конечно же, и другие варианты (см. далее).

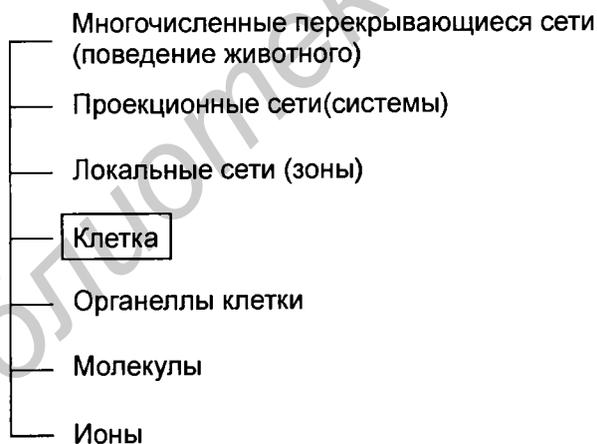


Рис.1. Уровни организации нервной системы [88].

\* Отмечу, что без опоры на них эта работа просто не состоялась бы.

Что же вселяет определенную уверенность в возможности успешного многоуровневого моделирования мозга? Кроме отмеченного, главная мысль в целом очень метко и образно выражается следующими словами Д. Хьюбеля – выдающегося исследователя мозга, а именно [11]: “… в чудовищной сложности нервной системы почти всегда можно усмотреть известную степень упорядоченности”. Итак, в нейрофизиологии, нейропсихологии, нейрокибернетике установлено [7,11–14,19,28,32,89,90] (см. также ранее), что для мозга характерна определенная структурированность (иерархичность) его систем на разных уровнях с многочисленными вертикальными, горизонтальными и обратными связями. Все это свидетельствует о том, что у Природы, судя по всему, не было другого пути, так как без этого мозг просто не справился бы с еще более чудовищными потоками информации\*, поступающими в него. Нужна была очень мощная иерархическая система обработки и хранения информации, к тому же чрезвычайно эффективная и очень экономичная, т.е. мозг.

Принципиально важными были исследования выдающегося американского нейрофизиолога В. Маунткастла, который показал, что кора головного мозга использует аналогичный принцип обработки сигналов различной модальности (зрительных, слуховых и др.).

Лучше всего предоставить ему же слово [39]: “Общая идея состоит в следующем. Крупные структуры в головном мозгу, известные как ядра (или области) новой коры, лимбическая доля, дорсальный таламус и т.п., сами состоят из повторяющихся *локальных нервных цепей*, модулей, которые варьируют от одной крупной структуры к другой по числу клеток, внутренним связям и способу обработки, но которые в пределах данной структуры в основном сходны (Szentagothai, Arbib, 1974; Szentagothai, 1975). Каждый модуль представляет собой локальную нервную цепь, которая обрабатывает информацию, передает ее со своего входа на выход и при этом подвергает ее трансформации, определяемой общими свойствами структуры и ее внешними связями. Модули объединяются в структуры – например, в ядра или в области коры – общей или доминирующей связью, потребностью в наложении функции на определенное топографическое представительство или каким-нибудь иным фактором. Группа модулей, составляющая структуру, сама может быть разбита

---

\* Так, согласно оценкам “только зрительная система может передавать в мозг  $4,3 \cdot 10^6$  бит информации в секунду” [17].

на подгруппы разными связями с обособленными таким же образом подгруппами в других крупных структурах. Тесно и многократно взаимосвязанные подгруппы модулей в разных и часто далеко отстоящих друг от друга структурах образуют, таким образом, точно связанные, но распределенные системы. Сохранение соседних отношений между взаимосвязанными подгруппами топографически организованных структур создают “гнездные” распределенные системы. *Такая распределенная система предназначена для обслуживания распределенной функции.* Один модуль структуры может быть членом нескольких (но не многих) таких систем. Только в пограничном случае все модули совокупности могут иметь одинаковые связи.

Я намерен рассмотреть эти идеи, в особенности по отношению к новой коре, а также общее представление, что функция обработки, осуществляемая модулями новой коры, качественно сходна во всех областях”.

Для нас также важно отметить, что В. Маунткастл обозначил “основную модульную единицу новой коры как мини-колонку”, которая включает около 110 – 260 нейронов [39]. Существуют, однако, и гораздо большие “макро-колонки”, которых в новой коре около  $6 \cdot 10^5$ , “причем каждая из них содержит несколько сот мини-колонок” [39].

Каков же может быть принцип построения системы многоуровневого моделирования мозга, например психических функций в соответствии с принятой электронной интерпретацией? Прежде всего оценим, хотя бы грубо, о какой сложности электрической цепи первого типа идет речь. Так, известно, что “при мыслительных процессах возбуждаются группы нервных клеток  $10^5$  –  $10^6$  нейронов” [3]. Можно сделать и более пессимистическую оценку. Уже отмечалось, что число зон, участвующих в мыслительной деятельности, около  $10^3$  –  $10^5$ . Если учесть, что зону могут формировать микро- или макро-колонки по Маунткастлу В. (см. ранее), то нижняя граница будет также  $10^5$ , а вот верхняя существенно выше – около  $10^9$ . Интересно отметить, что даже верхняя (пессимистическая) граница соответствует уровню интеграции современных УБИС. Следовательно, *можно сделать весьма осторожный прогноз о том, что задача моделирования мыслительной деятельности, в принципе, возможна.*

В связи с изложенным выше разумно начать с определенного симбиоза уровней табл. 1 (правая колонка) и рис. 1. Так, локальные сети (зоны) (по принятой

терминологии – небольшие по количеству нейронов электрические цепи первого типа), по-видимому, могут быть промоделированы на схемотехническом уровне\*. Для того, чтобы это осуществить, необходимо, прежде всего, разработать библиотеку моделей элементов (в терминах микро- и нанoeлектроники). Фактически это осуществляется на уровне моделирования элементов – второй уровень табл. 1 (правая колонка). В частности, необходимо создать многочисленные электрические модели\*\* следующих элементов (см. выше): ионных каналов, аксонов, дендритов, шипиков, синапсов, тел клеток и др. При этом, в принципе, может быть учтено влияние химических, тепловых и других значимых процессов. Далее после схемотехнического моделирования строятся макромоделли локальной цепи и мы переходим на следующий уровень моделирования, например, согласно рис. 1 – это проекционные сети (системы) и т. д.

Здесь сразу же отмечу, что наибольшей сложностью разработки при многоуровневом моделировании ИС характеризуются именно нижние иерархические уровни, т. е. 1 и 2 (табл. 1, правая колонка) [84,86]. Так, достаточно отметить, что самый нижний первый технологический уровень для мозга будет соответствовать уровню моделирования формирования нейронных цепей. Это фантастической сложности задача, так как фактически необходимо промоделировать всю предыдущую историю их формирования, включая указанных выше 8 главных стадий развития.

Достаточно высокой сложностью разработки будет характеризоваться и второй иерархический уровень, т. е. элементный (см. выше). Мировой опыт в области микроэлектроники, особенно нанoeлектроники, показывает, что подобные задачи по моделированию элементов характеризуются исключительно высокой степенью сложности и трудоемкости. Детальный анализ этой проблемы дан в цикле статей автора [23,91]. Так, известная система NEMO моделирования некоторых приборов нанoeлектроники разрабатывается в США, начиная с 1993 года (сейчас под эгидой NASA), и предназначена для использования на суперЭВМ. Под руководством автора разрабатывается система NANODEV моделирования нанoeлектронных приборных структур на эффектах одноэлектронного, резонансного туннелирования и квантовых проволоках,

---

\* Если не удастся (велики требуемые вычислительные ресурсы ЭВМ), то цепь разбивается на цепи с меньшим числом элементов. Это обычная практика при моделировании ИС.

\*\* Определение электрической модели может быть найдено в [84,86].

начиная с 1995 года [92,93]. Проблемы здесь, прежде всего, связаны с необходимостью разработки сложных комбинированных моделей, причем обычно встречающимися случаями являются взаимодействия наноструктур (активных областей) и макроскопических областей, т. е. имеют место квантовые измерения в традиционном для квантовой механики понимании. Специалистам известно, что это исключительно сложный вопрос. Кроме того, целесообразно разрабатывать иерархии моделей различной адекватности. В результате, работы характеризуются большой длительностью.

Согласно изложенному выше важными элементами нейронных цепей являются ионные каналы – сложные наноэлектромеханические системы. Для их детального анализа целесообразно использовать многоуровневое моделирование. Такой подход с успехом был реализован при моделировании другой достаточно сложной наноэлектромеханической системы, в частности радиоприемника на основе углеродных нанотрубок [94]. Хотя и здесь требуется использование мощной вычислительной техники, однако, важным моментом этого исследования являлось применение ранее разработанных лицензионных программ. Это позволило авторам оперативно решить такую достаточно сложную задачу.

Итак, что же мы получаем? Неужели отмеченный выше осторожный прогноз не сбудется?

Автор уверен, что, несмотря на отмеченные колоссальные сложности, особенно на нижних иерархических уровнях, это возможно. Но за это придется опять же “заплатить” дальнейшими упрощениями (следующие шаги идеализации), во всяком случае на начальных этапах разработки. Здесь уместно отметить, что при моделировании ИС, как известно специалистам, уровни 1 и 2 обычно не реализуются в деталях, а “хитро” обходятся. Для этого применяются комбинированные\* (во многом эмпирические) модели элементов (типа BSIM2, ..., BSIM5 [95]). В этом случае, задавая ключевые конструктивно-технологические и другие параметры, осуществляется переход сразу на 3 уровень, т. е. схематехнического моделирования, минуя уровни 1 и 2. Таким

---

\* Отмеченные, строго говоря, комбинированные модели включают компоненты электрических, физико-топологических и формальных моделей при интенсивном использовании экспериментальных данных, однако базовыми все же являются электрические модели, так как предназначены для схематехнического моделирования [86]. Поэтому в дальнейшем просто электрические модели.

образом, и при исследовании мозга целесообразно разработать подобные электрические модели основных элементов нейронных цепей в зависимости от морфологических, нейрофизиологических и других данных. Ясно, что и здесь должно использоваться самое современное оборудование.

Отмечу, что в настоящее время уже используется широкий спектр экспериментальных методов и различных средств, а именно [12,16,17]: методы сканирования мозга (компьютерная томография, позитронно-эмиссионная томография, магнитно-резонансное отображение), электроэнцефалография, электрические раздражения мозга с помощью микроэлектродной техники, химические препараты и лекарства, исследования, основанные на разрушениях и патологиях мозга, и др. Здесь уместно заметить, что еще в 60-х годах прошлого века академиком Бехтеровой Н.П. и ее коллегами был предложен комплексный подход к изучению мозга, основанный на разнообразных экспериментальных исследованиях [19,36]. И тем не менее, автор считает, что качественно новые возможности появятся с более интенсивным использованием достижений в области нанoeлектроники, нанофотоники, нанотехнологий и наноматериалов. Очень впечатляющими примерами, подтверждающими это, являются применения оптогенетики и нанопроволок [31]. Одна из важнейших причин необходимости такого развития заключается в том, что многие экспериментальные данные специальных дисциплин о мозге должны быть либо уточнены, либо просто пересмотрены ввиду их явной противоречивости\*.

Итак, *после разработки электрических моделей элементов нейронных цепей с применением также самого современного оборудования в соответствии с принятой электронной интерпретацией многое в поведении мозга можно будет промоделировать на схематехническом уровне, т. е. нелинейных электрических цепей первого типа.* После реализации данного ключевого этапа может быть осуществлен, как уже отмечалось, переход на более высокие иерархические уровни с целью моделирования более сложных функций. Отмечу, что в предлагаемой схеме многоуровневого моделирования могут использоваться не только подходы, методы, методики, отработанные при подобном исследовании ИС, т. е. накопленный в этой области опыт, но и многое разработанное программное обеспечение (инструментарий). Это

---

\* К сожалению, многие из используемых даже на настоящий момент времени экспериментальных методов исследования мозга все еще достаточно грубы.

чрезвычайно важно, так как может значительно ускорить процесс исследования мозга.

Полезны ли здесь будут многочисленные ранее разработанные модели в биофизике, нейрофизиологии, нейропсихологии, нейрокибернетике (см., например, [6,12,17,19–22,27,32–34,36,40,89,90,96–109])? Несмотря на определенный хаотический характер в их разработке, бесспорно да. Уверенность автора связана с тем, что наиболее удачные модели в этих областях, а их немало, могут рассматриваться в свете изложенного, в том числе принятой второй гипотезы, в качестве макромоделей, которые скорее всего возможно получить в результате упрощений из более строгих, в конечном итоге квантовомеханических моделей. Следовательно, такие удачные модели могут быть “встроены” в схемы многоуровневого моделирования мозга. Ввиду исключительно высокой степени сложности задачи, к очень перспективному следует отнести синергетический подход [46,110]. И тем не менее ситуация в целом может быть метко охарактеризована словами сорокалетней давности выдающегося американского нейрокибернетика М. Арбиба [89]: “... наши модели все еще весьма грубы и чрезвычайно упрощены по сравнению со сложностью настоящего мозга.” К сожалению, на настоящий момент времени здесь много феноменологии и часто плохо обоснованных догадок.

Подводя итог проведенного рассмотрения, кратко отвечу на следующий вопрос: “Что же вселяет уверенность в том, что задача более детального исследования функционирования мозга может быть решена?”

Выделю лишь три основных аргумента.

Во-первых, у нас есть уникальный и очень мощный аппарат в виде квантовой механики, который не давал “сбоев” при решении самых разнообразных и сложных задач при грамотном его использовании либо служил надежной базой для такого исследования. Во-вторых, приведенные сведения свидетельствуют о структурированности мозга, иерархичности в его работе, наличии общих принципов при обработке поступающей информации различной модальности (зрительной, слуховой, обонятельной, вкусовой и тактильной). В-третьих, у нас уже накоплен значительный опыт решения подобных задач в области микро- и нанoeлектроники. И здесь уместно вспомнить слова о мозге Дж. фон Неймана, написанные более шестидесяти лет тому назад, а именно: “У нас нет совершенно никакого предшествующего опыта относительно систем такой

степени сложности” [21]. Сейчас он есть и мы можем выйти из “лягушатника” в исследовании мозга, выражаясь очень метким и образным словом этого великого ученого, написанным тогда же [21].

Считаю здесь полезным сделать два дополнительных замечания, вытекающих из отмеченного опыта. Во-первых, из проведенного рассмотрения следует, что очень детальное моделирование функционирования мозга вряд ли возможно. И тем не менее, хотя мы и имеем суперсложную задачу электроники, в наиболее важных аспектах (механизмах) работы мозга удастся разобраться, так же как и с ИС высокой степени интеграции. Отмечу, что и в последнем случае всего мы не знаем и никогда не узнаем. Во-вторых, опыт в области микро- и наноэлектроники свидетельствует, что переход в область проектных норм менее 100 нм, т. е. наноэлектроники, оказался не столь фантастически сложным, как ранее казалось. Более того, специалистам известно, что “поход” даже в субмикронную область микроэлектроники вначале представлялся вряд ли возможным, не говоря уже о нанометровом диапазоне. Поэтому скорее всего и с мозгом все будет не столь сложно, как представляется сейчас. Самое главное нам целесообразно пойти по рассмотренному пути, т.е. многоуровневого моделирования мозга в рамках предложенной электронной интерпретации.

## 5. А что же дальше?

Можно выделить очень много интересных проблем и задач, связанных с мозгом. Здесь их все рассмотреть просто невозможно. Поэтому остановлюсь кратко лишь на некоторых комплексах таких проблем и задач.

О непосредственном исследовании самого мозга. Ключевые проблемы такого исследования выделялись многими специалистами. Отмечу лишь “две центральные задачи физиологии” В. Маунткастла [39]. Следуя этому выдающемуся нейрофизиологу, на основе анализа литературы и проведенного рассмотрения также выделю два главных направления (проблемы) дальнейшего изучения самого мозга, а именно:

- 1) необходимо разобраться с основными деталями формирования и функционирования локальных нейронных цепей (условно *микроуровень* исследования);
- 2) необходимо понять как происходит инициация и управление различных мыслительных процессов, какие при этом структуры мозга функционируют и в какой последовательности (условно *макроуровень* исследования).

Говоря о первой проблеме, конечно же, сделано немало, однако, как свидетельствуют современные данные нейрофизиологии, остается еще очень много неясностей [12]. Вторая проблема не менее захватывающая, так как необходимо разобраться в сложнейшей кооперативной деятельности различных подсистем мозга и в то же время самостоятельности их функционирования, т. е. в этом своеобразном “великом оркестре”, включая, конечно же, “дирижера”. В свете рассмотренного многоуровневого подхода к моделированию мозга в рамках предложенной электронной интерпретации его работы первая проблема связана с нижними иерархическими уровнями, а вторая – с верхними.

О контактных системах “мозг – искусственный объект”, “мозг – искусственный объект – мозг”. Данному, по сути дела, вопросу посвящено большое число публикаций, включая научно-фантастические и серьезные научные работы. Достаточно отметить фундаментальные учения великих русских физиологов Ивана Михайловича Сеченова и Ивана Петровича Павлова о безусловном и условном рефлексах [1,111]. В связи с этим остановлюсь лишь на наиболее важных для последующего результатах.

Прежде всего вспомним исследования по электрическому раздражению мозга (ЭРМ) с помощью техники вживленных электродов [8,18,19]. Уже отмечалось, что с помощью ЭРМ можно вызвать самые различные реакции, в том числе психические.

Большой эффект в свое время вызвали пионерские опыты Х. Дельгадо с коллегами, основанные на методе ЭРМ, с помощью “стимосиверов” – миниатюрных радиоэлектронных устройств “для передачи и приема радиосигналов, направленных к мозгу и от него” [8]. Опыты проводились в основном на обезьянах, причем и с применением ЭВМ. Эксперименты подтвердили “возможность установления прямой связи между мозгом и вычислительной машиной, минуя органы чувств, а также возможность автоматического обучения путем прямой подачи сигналов на определенные структуры мозга без участия сознания” [8]. Не меньшее впечатление в свое время вызвали кадры, на которых “удалось неоднократно продемонстрировать, что раздражение мозга подавляет агрессивность быка\* ... и его можно внезапно остановить в самый разгар атаки” [8].

И тем не менее некоторые поведенческие акты не удалось получить [8,18,19]. Пионеры данных исследований связывали это с грубостью метода. Так, Х. Дельгадо писал [8]: “Электрическое раздражение мозга – это, по сути дела, довольно грубый метод”. Действительно, если придерживаться принятой интерпретации, то для того, чтобы возникли некоторые сложные поведенческие акты необходимо, по-видимому, два условия. 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 элемента электрической цепи\*\* первого типа (см. ранее). Во всяком случае реальный прогресс может быть достигнут в этих направлениях. В то же время известно [19], что в применяемой микроэлектродной технике, как правило, одновременно возбуждаются большие

---

\* Речь идет о “быках торо – животных, злобность которых специально повышали с помощью отбора на протяжении многих поколений” [8].

\*\* Очевидно, что более или менее строгая электрическая модель даже отдельного нейрона будет представляться достаточно сложной распределенной эквивалентной электрической схемой. Поэтому речь и идет об определенной точке нейронной цепи.

массивы нейронов. В связи с этим удивление вызывает другое. Как вообще были получены достаточно сложные поведенческие акты? То, что они наблюдались в эксперименте, свидетельствует в пользу того, что, с одной стороны, мозг не столь “утонченное устройство” как считается многими\*, а, с другой, – скорее всего схемы многоуровневого моделирования, основанные даже на не очень детальных моделях, включая описанную выше схему, позволят получить весьма убедительные результаты.

Несмотря на относительную грубость метода ЭРМ на основе микроэлектродной техники, с его помощью уже достигнуты существенные результаты в медицине. Достаточно отметить кохлеарные импланты у потерявшего слух человека, которые с успехом используются с целью его восстановления и “представляют собой неопровержимое свидетельство, живой пример интеграции людей и компьютеров” [31]. Данный успех связан с заменой утраченных сенсорных волосковых клеток кохлеарными имплантами, т.е. достаточно высокой степенью локализации воздействия в этом случае, что косвенно подтверждает целесообразность выполнения отмеченных двух условий.

В связи с изложенным выше, автор полагает, что со временем будет возможным считывать мысль человека и воспринимать ее людьми с применением искусственных объектов (устройств). Тут, конечно же, встретится немало проблем. Одна из очень интересных будет связана с отличиями в кодировании информации в мозге у различных людей, которые определяются спецификой (индивидуальностью) нейронных цепей (см. ранее). Это проблема совместимости, которая подобна и для подчерка людей\*\*. Думаю, что “помощь” в рассматриваемом случае окажут не только искусственные устройства, но и непосредственно мозг принимающего информацию человека вследствие его важнейшего свойства – пластичности, т.е. потребуются определенный период освоения, адаптации, т.е. научения к ее восприятию таким образом. По-видимому, не менее сложной проблемой по сравнению с передачей и восприятием информации от мозга к мозгу будет проблема ее прямой записи в мозг. Для этого потребуются создание устройств, преобразующих различные сигналы (оптические, звуковые, химические и др.) сразу в коды мозга. И тем не менее автор считает, что и эти проблемы будут решены. По изложенным

---

\* Вероятно в таких исследованиях реализуется хорошо известное явление доминанты [10].

\*\* Не исключено, что различие в кодировании как раз наглядно проявляется в подчерке людей.

причинам создание Всемирной Сети Разума [31] мне не кажется фантастикой, а вполне реальным проектом. И здесь значительный прогресс может быть достигнут с применением нанoeлектроники, нанофотоники, наноматериалов и нанотехнологий. Началом этого процесса можно считать использование нанопроволок и оптогенетики [31].

В заключение краткого рассмотрения выделенных двух комплексов проблем и задач отмечу, что это разделение весьма условно, так как настоящий успех в исследовании мозга невозможен без учета его взаимодействия с другими объектами.

О создании искусственных объектов, эквивалентных мозгу. Этот вопрос наиболее популярен в литературе по кибернетике, искусственному интеллекту. Очень хорошо динамику взглядов по данному вопросу отражает следующая фраза М. Арбиба [112]: "... многие различия между человеком и машиной, которые до последнего времени казались очень существенными, являются только количественными". Хотя это в целом и так, однако, как было показано выше, между ИС и мозгом все же существуют весьма серьезные, качественные отличия. Одно из самых существенных – возможность гибкой модификации электрических цепей первого типа. Природа создала очень "хитрую" электронику – оригинальное приемно-передающее\* устройство в одном объекте – шедевр на основе взаимодействия электрических и химических процессов. Следует признать, что, к сожалению, строго доказать возможность создания аналогичных искусственных объектов сейчас просто невозможно.

И тем не менее можно привести следующие дополнительные аргументы к сказанному многими оптимистами в рассматриваемой области ( см., например, [5,31,43]). В соответствии с изложенным ранее мыслительная деятельность, судя по всему, – суть макроскопические коллективные явления в нелинейных электрических цепях первого типа. Если это так, то уместно вспомнить слова одного из основателей синергетики – выдающегося немецкого ученого Г. Хакена, а именно [46]: "... с абстрактной точки зрения синергетики кооперативные эффекты могут приводить к такому же макроскопическому поведению систем с совершенно различными макроскопическими компонентами. Существенны лишь параметры порядка". На основе этих двух

---

\* Как и в известных приемных устройствах (радиоприемнике, телевизоре и т.п.), здесь, кроме приема, конечно же, важны обработка и воспроизведение информации.

посылок можно сделать далеко идущий вывод о том, что системы типа мозга могут быть реализованы и искусственно! Не исключено, что это допустимо осуществить не обязательно на подобных выбранным Природой элементах, но и на других. Возможно, что отмеченные в работе отличия между электрическими цепями первого и второго типов помогут в прогрессе в данной области.

Рассмотренное направление создания искусственных объектов будет связано с технологиями, основанными на процессах типа “сверху-вниз” и “снизу-вверх” или их комбинации. Во всяком случае об этом свидетельствует положительный опыт в области микро- и нанoeлектроники, нанотехнологий (см., например, [91,113]).

Возможен, однако, и качественно иной, гораздо более эффективный подход, который автор в работе [91] назвал “от имеющегося”. Сущность его заключается в модернизации или модификации естественных биологических процессов. Необходимо отметить, что данный подход с успехом неявно и давно используется в медицине. Примерами могут служить многочисленные лекарства, улучшающие работу мозга, кохлеарные импланты, возвращающие слух человеку, и др. Можно в определенном смысле и повторить (точнее обхитрить) то, что сделала Природа, т.е. сделать такую же точно систему как человек, включая, естественно, мозг. Это клонирование человека. Но надо ли это? (см. далее).

Здесь уместно кратко остановится на другой грандиозной проблеме – квантовых компьютерах. Динамику отношения к ней можно кратко охарактеризовать так: “от эйфории к нарастающему пессимизму”. Детально проблема рассмотрена в статьях выдающегося советского и российского ученого в области микро- и нанoeлектроники – академика К.А. Валиева и его коллег [114,115]. Поэтому здесь обращаю внимание на одну серьезную проблему, которую упускают из виду. Так, рассматривая баллистический транспорт в нанотранзисторах [91], автор отмечал, что любое взаимодействие микрочастицы в соответствии с квантовой механикой может интерпретироваться как столкновение и будет иметь место даже в вакууме с постоянно рождаемыми и уничтожаемыми микрочастицами, т.е. фактически такой транспорт – полезная идеализация. Конечно же, это не является доказательством нереализуемости квантовых компьютеров в принципе, однако

добавляет “ложку дегтя в бочку с медом”. И тем не менее работы в этом направлении должны продолжаться. Тут я полностью согласен с профессором М.Б. Менским [65]. С одной стороны, из истории известно, что строгое доказательство невозможности вечного двигателя второго рода привело к созданию термодинамики – мощного раздела физики. С другой стороны, работа в этой области уже привела к очень интересным результатам в физике, математике, электронике и др. [114,115]. Судя по всему, это еще одна, как минимум, “марафонская задача”, т.е. просто не надо надеяться на быстрый успех.

Несколько слов о тайнах мозга мифических, мистических и реальных, которые производят красивый эффект (см., например [13,16,35,116–118]). Действительно, автор в целом согласен с Д. Майерсом [16] в том, что в подавляющем числе случаев при более или менее детальном рассмотрении (проверке и т. п.) большинство этих “феноменов” оказывается просто “мыльными пузырями”, т. е. некорректными сведениями, или объясняются случайными совпадениями. И тем не менее есть серьезные вопросы, связанные с экстрасенсорикой (см., например [117]), на которые даже удовлетворительных ответов пока нет. К этим вопросам наука должна относиться более аккуратно, хотя бы потому, что в противном случае число ее оппонентов увеличивается. Тем более, как уже отмечалось, при исследовании мозга есть объективная основа для спекуляций. И в то же время у автора не вызывает сомнения, что многие явления могут быть объяснены в рамках предложенной электронной интерпретации работы мозга, спецификой функционирования электрических (нейронных) цепей первого типа.

## Заключение

Ранее отмечалось, что для строгого рассмотрения функционирования мозга необходимо анализировать очень сложный и своеобразный “запутанный клубок” большого числа физико-химических процессов часто взаимосвязанных. Для того, чтобы попытаться его “распутать” и была предложена описанная последовательная электронная интерпретация. Насколько это удалось – судить читателю. Так же, как известные компьютерная [6,89] и голографическая [49] метафоры\* [89], предложенная интерпретация может быть в принципе названа электронной метафорой. В связи с этим необходимо также особо подчеркнуть, что автор не питает иллюзий. Мозг, конечно же, гораздо сложнее. Он просто архисложен. Рассмотренная проблема – это бесспорно, говоря образно, “Эверест\*\* Науки”. При его “штурме” могут быть важны любые, казалось бы на первый взгляд, детали. Поэтому уместно вспомнить следующие слова выдающегося английского физиолога – Грея Уолтера [2]: “Когда говоришь о мозге лучше исходить из положения, что незначущих явлений не существует”. Подобной точки зрения придерживались многие исследователи мозга.

Хотя ряд воздействий на мозг может быть в принципе учтен в рамках предложенной интерпретации, например, температура, ионизирующее излучение, освещение, механическая перегрузка, атмосферное давление, однако, предстоит сделать немало по разработке соответствующих моделей, так как тут еще очень много неясностей. Существуют значительные неясности и в самой нейрофизиологии, в частности, роли клеток нейроглии\*\*\*, которых гораздо больше (приблизительно на порядок), чем нейронов [41].

И тем не менее автор верит в полезность электронной метафоры, кроме уже отмеченного, по следующим причинам. Во-первых, она позволяет продвинуться вперед в понимании мозга. Задача становится более понятной хотя бы в целом. Во-вторых, с ее помощью перебрасывается вполне “естественный мост” к другим важным дисциплинам, в частности, кибернетике (искусственный интеллект и др.) и искусственной электронике. А в них немало

---

\* Критика компьютерной и голографической метафор дана в книгах [119] и [89] соответственно.

\*\* Подобные сравнения с Эверестом, оркестром, дирижером иногда встречаются в литературе (см., например, [118]).

\*\*\* Они, по-видимому, выполняют различные вспомогательные функции [12].

выдающихся достижений, имеющих огромную практическую ценность, которые могут быть полезны. И, наконец, в-третьих, возможно, метафора позволяет наметить не самый прямой и простой, но на настоящий момент времени вполне реальный “маршрут штурма Эвереста Науки”. Ведь и штурм Эвереста, как известно, производится поэтапно, т. е. многоуровнево.

В заключение необходимо сделать замечание об этических проблемах исследования мозга. Об этом писали очень многие ученые (см., например, [8,13,14,19]). В связи с развитием нанoeлектроники, нанофотоники, наноматериалов, нанотехнологий и нанонаук в целом, эта проблема приобретает очень серьезный, международный характер\*. Ведь даже атомное оружие может показаться “семечками” по сравнению с возможным “вторжением” в самую интимную сферу Человека – его мозг. Ясно, что такого рода исследования по мозгу должны находиться под очень жестким международным контролем.

И все же хотелось бы закончить работу на оптимистической ноте словами выдающегося исследователя мозга – Х. Дельгадо, а именно [8]: “Но существует один аспект исследований на человеке, о котором обычно забывают, – это наш моральный и общественный долг развивать науку на благо человека”.

*Автор считает своим приятным долгом выразить искреннюю признательность моим ученицам Н. В. Коломейцевой, И. А. Романовой и И. Ю. Щербаковой за подготовку монографии к печати.*

---

\* Здесь уместно отметить своевременную книгу по военным нанотехнологиям [120].

## Список литературы

1. Сеченов И.М. Избранные произведения. М.: Гос. учеб.-педаг. изд-во Минист. просв. РСФСР, 1958. 416 с.
2. Грей Уолтер. Живой мозг. М.: Мир, 1966. 300 с.
3. Иванов-Муромский К.А. Нейроэлектроника, мозг, организм. Киев: Наукова думка, 1983. 175 с.
4. Мак-Каллок У. Надежность биологических систем. В сб.: Самоорганизующиеся системы. М.: Мир, 1964. С. 358–380.
5. Вулдридж Д. Механизмы мозга. М.: Мир, 1965. 344 с.
6. Нейман Дж. Вычислительная машина и мозг. Кибернетический сб. Вып. 1. М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 11–60.
7. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
8. Дельгадо Х. Мозг и сознание. М.: Мир, 1971. 264 с.
9. Куффлер С., Николс Дж. От нейрона к мозгу. М.: Мир, 1979. 440 с.
10. Коган А.Б. Основы физиологии высшей нервной деятельности: Учебник. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.
11. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с.
12. Николлс Дж.Г., Мартин А.Р., Валлас Б.Дж., Фукс П.А. От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 672 с.
13. Лурия А.П. Основы нейропсихологии. М.: Изд-во МГУ, 1973. 375 с.
14. Хомская Е.Д. Нейропсихология. М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 288 с.
15. Столяренко Л.Д. Основы психологии: Учебное пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2003. 672 с.
16. Майерс Д. Психология. Мн.: Попурри, 2006. 848 с.

17. Солсо Р. Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2006. 589 с.
18. Пенфильд В., Робертс Л. Речь и мозговые механизмы. Л.: Медицина, 1964. 264 с.
19. Бехтерева Н.П., Гоголицын Ю.Л., Кропотов Ю.Д., Медведев С.В. Нейрофизиологические механизмы мышления: Отражение мыслительной деятельности в импульсной активности нейронов. Л.: Наука, 1985. 272 с.
20. Нейман Дж. Вероятностная логика и синтез надежных организмов из ненадежных компонент. Автоматы. Сб. статей. М.: Изд-во иностранной литературы, 1956. С. 68–139.
21. фон Нейман Дж. Общая и логическая теория автоматов. В кн.: Тьюринг А. Может ли машина мыслить? М.: Гос. изд-во физико-матем. литер., 1960. С. 59–101.
22. фон Нейман Дж. Теория самовоспроизводящихся автоматов. М.: Мир, 1971. 384 с.
23. Абрамов И.И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанозлектроники. I. Основные положения // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 8. С. 34–37.
24. Анохин П.К. Избранные труды. Философские аспекты теории функциональной системы. М.: Наука, 1978. 400 с.
25. Абрамов И.И. Термин “элемент” в микро- и нанозлектронике // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 6. С. 2–4.
26. Нанотехнологии, метрология, стандартизация и сертификация в терминах и определениях / Под ред. М.В. Ковальчука, П.А. Тодуа. М.: Техносфера, 2009. 136 с.
27. Джаксон М.Б. Молекулярная и клеточная биофизика. М.: Мир, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 551 с.
28. Мозг. М.: Мир, 1984. 280 с.
29. Чораян О.Г. Нейронный ансамбль (идея, эксперимент, теория). Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета, 1990. 88 с.

30. Экклс Дж. Физиология синапсов. М.: Мир, 1966. 396 с.
31. Хорост М. Всемирный разум. М.: Эксмо, 2011. 288 с.
32. Иванов-Муромский К.А. Нейрофизиология, нейрокибернетика, нейробионика. Киев: Вища школа, 1985. 240 с.
33. Кашенко С.А., Майоров В.В. Модели волновой памяти. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2009. 288 с.
34. Волькенштейн М.В. Биофизика. М.: Наука, 1981. 576 с.
35. Бернацкий А.С. Загадочный и парадоксальный мозг. Мн.: Нар. асвета, 2011. 176 с.
36. Бехтерева Н.П. Здоровый и больной мозг человека. Л.: Наука, 1988. 262 с.
37. Вартамян Г.А. Проблемы управления памятью в эксперименте // Физиология человека. 1977. Т.3, № 5. С. 789–795.
38. Иванов-Муромский К.А. Мозг и память. Киев: Наукова думка, 1987. 136 с.
39. Эделмен Дж., Маунткасл В. Разумный мозг. М.: Мир, 1981. 135 с.
40. Рапопорт Г.Н., Герц А.Г. Биологический и искусственный разум. М.: Книжный дом “ЛИБРОКОМ”, 2011. Ч. I, 184 с.; Ч. II, 296 с.
41. Хомутов А.Е., Кульба С.Н. Анатомия центральной нервной системы: Учеб. пособие, Ростов н/Д: Феникс, 2007. 315 с.
42. Степаненко И.П. Основы микроэлектроники: Учеб. пособие. М.: Лаб. Базовых Знаний, 2004. 488 с.
43. Хокинс Дж., Блейкли С. Об интеллекте. М.: ООО “И.Д. Вильямс”, 2007. 240 с.
44. Макдональд М. Научи свой мозг работать. М.: Эксмо, 2010. 304 с.
45. Блинков С.М., Глезер И.И. Мозг человека в цифрах и таблицах. Л.: Медицина, 1964. 472 с.

46. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
47. Бабминдра В.П., Брагина Т.А. Структурные основы межнейронной интеграции. Л.: Наука, 1982. 164 с.
48. Гусельников В.И. Электрофизиология головного мозга (курс лекций): Учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1976. 423 с.
49. Прибрам К. Языки мозга. М.: Прогресс, 1975. 464 с.
50. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольших интегральных схем. М.: Мир, 1991. 327 с.
51. Эйди У.Р. Организация мозга: мозг как шумящий компьютер. В сб.: Основные проблемы электрофизиологии головного мозга. М.: Наука, 1974. С. 350–366.
52. Вайнберг С. Мечты об окончательной теории: Физика в поисках самых фундаментальных законов природы. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 256 с.
53. Джеммер М. Эволюция понятий квантовой механики. М.: Наука, 1985. 384 с.
54. Скалли М.О., Зубайри М.С. Квантовая оптика. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003. 512 с.
55. Гринштейн Дж., Зайонц А. Квантовый вызов. Современные исследования оснований квантовой механики. Долгопрудный: Изд. Дом “Интеллект”, 2008. 400 с.
56. фон Нейман И. Математические основы квантовой механики. М.: Наука, 1964. 368 с.
57. 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. 346.
58. Пенроуз Р., Шимони А., Картрайт Н., Хокинг С. Большое, малое и человеческий разум. М.: Мир, 2004. 191 с.

59. Волькенштейн М.В. Дополнительность, физика и биология // УФН. 1988. Т. 154, вып. 2. С. 279–297.
60. Иваницкий Г.Р. XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики // УФН. 2010. Т. 180, № 4. С. 337–369.
61. Реутов В.П., Шехтер А.Н. Как в XX веке физики, химики и биологи отвечали на вопрос: что есть жизнь? // УФН. 2010. Т. 180, № 4. С. 393–414.
62. Менский М.Б. Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов // УФН. 2000. Т. 170, № 6. С. 631–647.
63. Менский М.Б. Концепция сознания в контексте квантовой механики // УФН. 2005. Т. 175, № 4. С. 413–435.
64. Менский М.Б. Квантовые измерения, феномен жизни и стрела времени: связи между “тремя великими проблемами” (по терминологии Гинзбурга) // УФН. 2007. Т. 177, № 4. С. 415–425.
65. Менский М.Б. Человек и квантовый мир. Фрязино: Век 2, 2005. 320 с.
66. Пенроуз Р. Новый ум короля: О компьютерах, мышлении и законах физики. М.: Издательство ЛКИ, 2008. 400 с.
67. Пенроуз Р. Тени разума: в поисках науки о сознании. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. 688 с.
68. Отклики читателей на статью М.Б. Менского “Квантовая механика: новые эксперименты, новые приложения и новые формулировки старых вопросов” // УФН. 2001. Т. 171, № 4. С. 437–462.
69. Фок В.А. Об интерпретации квантовой механики // УФН. 1957. Т. LXII, вып. 4. С. 461–474.
70. Ахиезер А.И., Половин Р.В. Почему невозможно ввести в квантовую механику скрытые параметры // УФН. 1972. Т. 107, вып. 3. С. 463–487.
71. Клышко Д.Н. Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения // УФН. 1998. Т. 168, № 9. С. 975–1015.

72. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики. М.: Наука, 1976. 664 с.
73. Панов А.Д. О проблеме выбора альтернативы в квантовом измерении // УФН. 2001. Т. 171, № 4. С. 447–449.
74. Ашкрофт Н., Мермин Н. Физика твердого тела. М.: Мир, 1979. Т. 1, 400 с.; Т. 2, 424 с.
75. Киреев П.С. Физики полупроводников. М.: Высш. школа, 1975. 584 с.
76. Блохинцев Д.И. Квантовая механика: Лекции по избранным вопросам. М.: Атомиздат, 1981. 96 с.
77. Липкин А.И. Существует ли явление “редукции волновой функции” при измерении в квантовой механике? // УФН. 2001. Т. 171, № 4. С. 437–440.
78. Гэри М., Джонсон Д. Вычислительные машины и труднорешаемые задачи. М.: Мир, 1982. 416 с.
79. Андронов А.А., Витт А.А., Хайкин С.Э. Теория колебаний. М.: Наука, 1981. 568 с.
80. Матханов П.Н. Основы анализа электрических цепей. Нелинейные цепи. М.: Высш. школа, 1977. 272 с.
81. Никольский В.В., Никольская Т.И. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983. 304 с.
82. Крон Г. Исследование сложных систем по частям (диакоптика). М.: Наука, 1972. 544 с.
83. Казеннов Г.Г., Соколов А.Г. Принципы и методология построения САПР БИС. М.: Высш. школа, 1990. 142 с.
84. Абрамов И.И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 152 с.
85. Казеннов Г.Г. Основы проектирования интегральных схем и систем. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 295 с.

86. Абрамов И.И. Лекции по моделированию элементов интегральных схем микроэлектроники: Учебное пособие. Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 116 с.
87. International Technology Roadmap for Semiconductors: 1999 edition. Austin, TX: International SEMATECH, 1999; 2009 edition.
88. Шеперд Г. Нейробиология: В 2-х т. Т. 1. М.: Мир, 1987. 454 с.
89. Арбиб М. Метафорический мозг. М.: Мир, 1976. 296 с.
90. Сентаготаи Я., Арбиб М. Концептуальные модели нервной системы. М.: Мир, 1976. 200 с.
91. Абрамов И.И. Проблемы и принципы физики и моделирования приборных структур микро- и нанoeлектроники // Нано- и микросистемная техника. 2006. ч. II. № 9. С. 26 – 36; 2007. ч. III. № 1. С. 36 – 47, ч. IV. № 2. С. 24 – 32, ч. V. № 3. С. 57 – 70, ч. VI. № 7. С. 10 – 24; 2009. ч. VII. № 7. С. 14 – 29, № 8. С. 7 – 23; 2010. ч. VIII. № 9. С. 27 – 37, № 10. С. 28 – 41, № 11. С. 29 – 42.
92. Абрамов И.И., Гончаренко И.А., Игнатенко С.А., Королев А.В., Новик Е.Г., Рогачев А.И. Система моделирования нанoeлектронных приборов – NANODEV // Микроэлектроника. 2003. Т.32, №2. С. 124–133.
93. Abramov I.I., Baranoff A.L., Goncharenko I.A., Kolomejtseva N.V., Bely Y.L., Shcherbakova I.Y. A nanoelectronic device simulation software system NANODEV: New opportunities // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7521. P. 75211E-1–75211E-11.
94. 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.
95. Захаров С.М., Масальский Н.В., Шафигулин М.М. Проблемы схемотехнического моделирования интегральных схем // Успехи современной радиоэлектроники. 2005. № 2. С. 43–50.

96. Экклс Дж. Физиология нервных клеток. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1959. 300 с.
97. Джордж Ф. Мозг как вычислительная машина. М.: Изд-во Иностранной литературы, 1963. 528 с.
98. Росс Эшби У. Конструкция мозга. М.: Мир, 1964. 412 с.
99. Розенблатт Ф. Принципы нейродинамики. Перцептроны и теория механизмов мозга. М.: Мир, 1965. 480 с.
100. Штейнбух К. Автомат и человек (кибернетические факты и гипотезы). М.: Советское радио, 1967, 496 с.
101. Катц Б. Нерв, мышца и синапс. М.: Мир, 1968. 221 с.
102. Бернс Б. Неопределенность в нервной системе. М.: Мир, 1969. 252 с.
103. Дейч С. Модели нервной системы. М.: Мир, 1970. 326 с.
104. Антомонов Ю.Г. Моделирование биологических систем. Справочник. Киев.: Наукова думка, 1977. 260 с.
105. Ходоров Б.И. Общая физиология возбудимых мембран. М.: Наука, 1975. 408 с.
106. Дунин-Барковский В.Л. Информационные процессы в нейронных структурах. М.: Наука, 1978. 167 с.
107. Соколов Е.Н., Шмелев Л.А. Нейробионика. Организация нейроподобных элементов и систем. М.: Наука, 1983. 280 с.
108. Иваницкий А.М., Стрелец В.Б., Корсаков И.А. Информационные процессы мозга и психическая деятельность. М.: Наука, 1984. 201 с.
109. Соколов Е.Н., Вайткявичюс Г.Г. Нейроинтеллект: от нейрона к нейрокомпьютеру. М.: Наука, 1989. 238 с.
110. Хакен Г., Хакен-Крелль М. Тайны восприятия. М.: Институт компьютерных исследований, 2002. 272 с.

111. Павлов И.П. Лекции о работе больших полушарий головного мозга. М.: Изд-во АМН СССР, 1952. 288 с.
112. Арбиб М.А. Мозг, машина и математика. М.: Наука, 1968. 224 с.
113. Кобаяси Н. Введение в нанотехнологию. Пер. с японск. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 134 с.
114. Валиев К.А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. 2005. Т. 175, № 1. С.3–39.
115. Валиев К.А., Вьюрков В.В., Орликовский А.А. Кремниевая наноэлектроника: проблемы и перспективы // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. № 6. С. 7–22.
116. Каструбин Э.М. Ключ к тайнам мозга. М.: Триада, 1995. 240 с.
117. Феномен “Д” и другие / Сост. Л.Е. Колодный. М.: Политиздат, 1991. 335 с.
118. 100 великих тайн сознания / Авт.-сост. А.С. Бернацкий. М.: Вече, 2011. 384 с.
119. Дрейфус Х. Чего не могут вычислительные машины. Критика искусственного разума. М.: Прогресс, 1978. 336 с.
120. Альтман Ю. Военные нанотехнологии. Возможности применения и превентивного контроля вооружений. М.: Техносфера, 2008. 424 с.