

УДК 621.382:612.82

И. И. Абрамов, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники, г. Минск,
Республика Беларусь, e-mail: nanodev@bsuir.edu.by

МОЗГ — ОБЪЕКТ ОРГАНИЧЕСКОЙ ГИБРИДНОЙ НАНОЭЛЕКТРОНИКИ, ИЛИ ВЗГЛЯД СО СТОРОНЫ. ЧАСТЬ II.

Поступила в редакцию 24.07.2012

Приводится новая интерпретация функционирования мозга — объекта органической гибридной наноэлектроники, созданного Природой. Наиболее близкий аналог искусственной электроники — интегральная схема микро- и наноэлектроники. Проводится сопоставление нейронных цепей мозга и интегральных схем и устанавливаются их основные различия. Показывается, что предложенная интерпретация и ее следствия позволяют не только более глубоко разобраться в принципах функционирования мозга, но и предложить перспективный комплексный подход его дальнейшего исследования, основанный на многоуровневом моделировании в сочетании с экспериментальными методами. В части II дается ответ на вопрос: "Как приблизительно функционирует мозг с точки зрения специалиста в области электроники?"

Ключевые слова: мозг, наноэлектроника, электронная интерпретация

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 [1]: "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 *нейротрансммиттерами* 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. Предоставим слово блестящему советскому и российскому нейрофизиологу академику Наталье Петровне Бехтеревой и ее коллегам [2]: "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 [3]: 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" [4], как наиболее полно отвечающий ее цели.

Во-вторых, приведенное выше описание (резюме), строго говоря, дано 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 [5, 6].

Наиболее кратко и в то же время емко работа мозга на нейропсихологическом уровне описана в другом блестящем учебнике [7]: "...мозг представляет собой сложную единую метасистему, состоящую из различных макросистем (проекционных, 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 [8]: "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 [5, 8—10]. Более того, важность для понимания психических функций мозга электрических процессов отмечалась многими авторами [2, 4, 11—14]. И, тем не менее, традиционно в специальных дисциплинах о мозге предпочтение отдается химическим сигналам, а не электрическим. Этот канонический взгляд выражает следующая фраза [15]: "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 "смер-

тельный удар по теории электрических цепей" [12], 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 [5]: "... 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 [16]: "...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, [18, 19]), 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*) [17]. 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 [17, 20]. К сожалению, "эти уравнения не выведены на основе физических принципов, а получены эмпирически" [17]. 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 [9]. И тем не менее отмеченные

теории позволяют объяснить возникновение (генерацию) и распространение потенциала действия, т. е. электрического сигнала, в нейроне [5].

"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*" [9]. Что же мы имеем с точки зрения электроники? Возбуждающий и тормозный 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 синапс¹ 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 (первый тип) мозга в такой интерпретации от современных ИС микро- и наноэлектроники (второй 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

¹ Отметим, что электронная интерпретация других типов синапсов не вызывает затруднений. Так, электрический синапс — нелинейная емкость с утечкой или "электрический выпрямитель" [6]. Смешанный синапс может интерпретироваться как сочетание синапсов двух других типов. В целом, возможны и иные представления этих нелинейных элементов нейронных цепей (см. далее).

химических процессов в мозге. Для этого, а также для того, чтобы проанализировать третье важное отличие, необходимо привлечь современные данные нейрофизиологии о том, как формируются нейронные цепи (см., например, [1, 5, 8]).

"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 эпендимы 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" [8].

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 число нейронов с возрастом уменьшается², а при этом количество зафиксированной информации, как правило, растет³. 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.

² Согласно современным данным относительно небольшое число новых нейронов при этом, судя по всему, может появляться [21].

³ Имеется в виду, конечно же, нормально функционирующий мозг.

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. Используя язык 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. 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 (число 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 [7, 12, 22, 23]. 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 [17] 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 рефлектировать, либо прекращаться" [17], 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" [24], т. е. фактически связывается с контактными системами между нейронами (синапсами) электрической цепи первого типа. Хотя и существуют отличные точки зрения (см., например [25]), она стала доминирующей в специальных дисциплинах о мозге [1]. Здесь лишь отметим мнение известного американского исследователя Дж. Эделмена о кандидатах на память, а именно [26]: "... 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) изменение содержания ионов в нейронах, что влияет на активность клеток; 3) изменение проводимости ионных каналов вследствие изменения свойств белков; 4) изменение числа ионных каналов проводимости; 5) синтез РНК, белков, приводящих к структурным изменениям в синапсах, шипиках, дендритах, аксонах, изменениям в ядре клетки и др. Возможна и организация

новых связей¹ 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 "букет" из отмеченного набора, по-видимому, и определяет вид памяти. Поэтому деление на мгновенную, кратковременную и долговременную память [7] является весьма условным². Замечу также, что многие авторы выделяют и другие виды памяти (см., например, работы [1, 25, 27, 28]), 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.

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 аксон³ при пассивной передаче электрического сигнала целесообразно моделировать с ис-

пользованием 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 поэтому, в первую очередь, 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 правило⁴, 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 ощутимым модификациям. Модификация некоторых из них может привести просто к трагическим последствиям. В то же время нейронные цепи, используемые при обработке сенсорной информации, в мыслительной деятельности и 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" [2]. 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 всего⁵, набор нелинейных электрических (нейронных) цепей двух видов, которые не должны модифицироваться и которые могут модифицироваться.* Близкими аналогами в микроэлектронике (см., например, [30]) являются ИС памяти, а именно постоянные запоминающие устройства (ПЗУ) и программируемые ПЗУ, соответственно. *Итак, память.* В связи с этим опять уместно вспом-

¹ 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.

² Недаром в работе [27] они названы "гипотетическими компонентами памяти".

³ Согласно современным данным аксоны могут стимулировать эффекты "памяти" [21] в нейронах.

⁴ Исключение из отмеченных ранее очевидно составляют оптические сигналы.

⁵ Не следует, конечно же, забывать о других составляющих мозга, а именно [29]: кровеносной системе, нейроглиальных клетках, которых больше, чем нейронов, и т. п., обеспечивающих важные вспомогательные функции (доставка требуемых веществ, питание и др.). Здесь мозг рассматривается как устройство хранения и обработки информации, мыслительной деятельности.

нить слова великого физиолога Ивана Михайловича Сеченова: "Память — сила, которая лежит в основе всего психического развития. Не будь в самом деле этой силы ... психическое развитие было бы невозможно" [31]. Сразу же замечу, что и многие другие исследователи мозга отмечают большую важность для его работы памяти (см., например, [23, 25, 32]), 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 [27]: кора, мозжечок и гиппокамп, "хотя следует подчеркнуть, что функции памяти распределены по всему мозгу".

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 [1]), 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 [2]. В этом, с одной стороны, огромная сложность анализа, а с другой стороны, — 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*¹ (декомпозиция и т. п.), т. е. происходит *кодирование* сигнала в ре-

¹ Этот термин достаточно общий и его можно использовать для описания почти всего, что происходит в мозге с электрическими сигналами. Поэтому ранее выделены и далее употребляются более конкретные понятия.

зультате 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 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 здесь², 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*

² Команда к действию может быть подана и после опознания объекта, например, к движению и т. п.

(внутреннее воспроизведение) электрического сигнала (сигналов), инициированного самим мозгом и проходящего по различным нейронным цепям мозга соответствующей пространственно-временной конфигурации. Следовательно, мысль — это своеобразный обратный процесс по отношению к обработке поступающей информации (прямой процесс), который инициируется, по-видимому, в основном корой головного мозга, т. е. по нейронным цепям проходят токи и возникают образы, понятия и т. п. в результате декодирования информации, содержащейся в соответствующих нейронных цепях. А это означает, что мы в основном мыслим "шаблонами", закодированными в имеющихся электрических цепях первого типа. И в этом огромная эффективность и экономичность работы мозга. Прохождение электрического (достаточно быстродействующего¹) 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 информацией, 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 имеющееся² (см., например, [1, 15, 27, 33]). Хочется, однако, верить, что в процессе творческой работы, хотя бы в некоторых случаях, может происходить определенная модификация (не обязательно возникновение новых связей, см. ранее) цепей, как при реальном внешнем воздействии, научении³. Здесь уместно также отметить большие

¹ В этом плане важна информация Н. П. Бехтерева и ее коллег о соизмеримости по порядку величин длительности импульсной активности нейронов с временными характеристиками мыслительной деятельности [2].

² По-видимому, это более типично для пожилых людей, так как возможности модификаций с возрастом ухудшаются.

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 [27]: 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 — это 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 — смешанный⁴. 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 обязательное взаимодействие с внешней средой (см., например, [1, 7, 8, 13]), т. е. прохождение нормального цикла развития в результате 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 [5, 9, 10, 34]: число нервных клеток $10^{10} \dots 10^{12}$; число синапсов $10^{14} \dots 10^{15}$; еще большее число ионных каналов и молекул⁵, являющихся ключевыми структурами. Более того, согласно современным данным число различных типов нервных клеток "несомненно, больше сотни, а может

³ Интересно заметить, что в творческом процессе многое выглядит именно как своеобразное самонаучение, т. е. как бы часто без внешнего воздействия.

⁴ В этом плане внутренний режим работы мозга — удобная идеализация (см. также далее).

⁵ Около 10^{22} на 1 см^3 [35].

быть, и больше тысячи" [9]; весьма разнообразными могут быть и ионные каналы [5]. Морфологические данные [36] 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 [15]. Сюда же следует добавить отмеченные ранее многочисленные индивидуальные особенности нейронных цепей. Так, данные электрофизиологии [37] 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 потрясает¹. В связи с этим не случайны огромные потенциальные возможности мозга в запоминании информации. Так, старые оценки объемов памяти в 10^{15} – 10^{16} бит [12] были, по-видимому, излишне оптимистическими по сравнению с современными — 10^9 – 10^{12} бит [1]. 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 сообщений в импульсной форме [2, 18, 38]. 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 звеньев², по-видимому, никак не меньше тысячи или скорее десятков тысяч зон" [2]. Поэтому важны могут быть "коллективные" или "кооперативные эффекты" [2]. С ними, в частности, можно связать и известную "голографическую теорию" функционирования мозга [38]. Интересно заметить, что подобные коллективные эффекты бывают важны и в сложных ультрабольших ИС (УБИС) (см., например, [39]), 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.

¹ Поэтому, как мне кажется, вполне понятен достаточно сложный вопрос о доступности информации [1].

² Имеется ввиду "жестких и гибких звеньев мозговых систем" [2].

Они как раз наиболее сильно и реагируют на определенный стимул [5].

В этом плане интерес представляют результаты моделирования простейших нейронных сетей³ монографии [19]. 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 число 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 такого поведения. Здесь уместно вспомнить слова лауреата Нобелевской премии Д. Хьюбеля [9]: "... 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" [40]. 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" [3]. 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 от 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 ре-

³ Автор умышленно здесь использует термин "нейронные сети", характерный для работ по искусственному интеллекту и используемый в цитируемой монографии.

шения. С детства человек учится работать в таких сложных условиях и более или менее успешно справляется с решением подобных задач (большинство нормальных людей). Прежде всего удаётся 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 [1]. С одной стороны, мозгу нужен просто отдых (определенное восстановление возможностей), а с другой стороны, по-видимому, идет различная обработка (систематизация) информации (сжатие, сортировка, закрепление и т. п. [1, 25]). Что же касается сновидений, то этот (внутренний¹) 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 управляемом²) по сравнению с мышлением (см. выше). Следовательно, сновидения — "хаотический режим" работы мозга³. 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.

Список литературы

1. Майерс Д. Психология. Минск: Попурри, 2006. 848 с.
2. 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.
3. Чораян О. Г. Нейронный ансамбль (идея, эксперимент, теория). Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета, 1990. 88 с.
4. Вулдридж Д. Механизмы мозга. М.: Мир, 1965. 344 с.
5. Николлс Дж. Г., Мартин А. Р., Валлас Б. Дж., Фукс П. А. От нейрона к мозгу. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 676 с.

¹ Он, по-видимому, наиболее близок к "чисто" внутреннему режиму работы мозга.

² Об этом свидетельствуют и данные нейрофизиологии сна [41].

³ 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 [25].

6. Экклс Дж. Физиология синапсов. М.: Мир, 1966. 396 с.
7. Хомская Е. Д. Нейропсихология. М.: Изд-во Моск. университета, 1987. 288 с.
8. Блум Ф., Лейзерсон А., Хофстедтер Л. Мозг, разум и поведение. М.: Мир, 1988. 248 с.
9. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с.
10. Мозг. М.: Мир, 1984. 280 с.
11. Грей У. Живой мозг. М.: Мир, 1966. 300 с.
12. Иванов-Муромский К. А. Нейроэлектроника, мозг, организм. Киев: Наукова думка, 1983. 175 с.
13. Дельгадо Х. Мозг и сознание. М.: Мир, 1971. 264 с.
14. Пенфильд В., Робертс Л. Речь и мозговые механизмы. Л.: Медицина, 1964. 264 с.
15. Хорост М. Всемирный разум. М.: Эксмо, 2011. 288 с.
16. 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.
17. Джаксон М. Б. Молекулярная и клеточная биофизика. М.: Мир, БИНОМ. Лаборатория знаний, 2009. 551 с.
18. Иванов-Муромский К. А. Нейрофизиология, нейрокибернетика, нейробионика. Киев: Вища школа, 1985. 240 с.
19. Кащенко С. А., Майоров В. В. Модели волновой памяти. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. 288 с.
20. Волькенштейн М. В. Биофизика. М.: Наука, 1981. 576 с.
21. Бернацкий А. С. Загадочный и парадоксальный мозг. Минск: Нар. асвета, 2011. 176 с.
22. Лурия А. П. Основы нейропсихологии. М.: Изд-во МГУ, 1973. 375 с.
23. Бехтерева Н. П. Здоровый и больной мозг человека. Л.: Наука, 1988. 262 с.
24. Варганян Г. А. Проблемы управления памятью в эксперименте // Физиология человека. 1977. Т. 3, № 5. С. 789—795.
25. Иванов-Муромский К. А. Мозг и память. Киев: Наукова думка, 1987. 136 с.
26. Эделмен Дж., Маунткасл В. Разумный мозг. М.: Мир, 1981. 135 с.
27. Солсо Р. Когнитивная психология. СПб.: Питер, 2006. 589 с.
28. Рапопорт Г. Н., Герц А. Г. Биологический и искусственный разум. М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2011. Ч. I, 184 с; Ч. II, 296 с.
29. Хомутов А. Е., Кульба С. Н. Анатомия центральной нервной системы: учеб. пособие. Ростов н/Д: Феникс, 2007. 315 с.
30. Степаненко И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие. М.: Лаб. базовых знаний, 2004. 488 с.
31. Сеченов И. М. Избранные произведения. М.: Гос. учеб.-педаг. изд-во Минист. просв. РСФСР, 1958. 416 с.
32. Хокинс Дж., Блейкли С. Об интеллекте. М.: Вильямс, 2007. 240 с.
33. Макдональд М. Научи свой мозг работать. М.: Эксмо, 2010. 304 с.
34. Блинков С. М., Глезер И. И. Мозг человека в цифрах и таблицах. Л.: Медицина, 1964. 472 с.
35. Хакен Г. Принципы работы головного мозга: Синергетический подход к активности мозга, поведению и когнитивной деятельности. М.: ПЕР СЭ, 2001. 351 с.
36. Бабминдра В. П., Брагина Т. А. Структурные основы межнейронной интеграции. Л.: Наука, 1982. 164 с.
37. Гусельников В. И. Электрофизиология головного мозга (курс лекций): учеб. пособие. М.: Высш. школа, 1976. 423 с.
38. Прибрам К. Языки мозга. М.: Прогресс, 1975. 464 с.
39. Ферри Д., Эйкерс Л., Гринич Э. Электроника ультрабольшой интегральной схем. М.: Мир, 1991. 327 с.
40. Эйди У. Р. Организация мозга: мозг как шумящий компьютер. В сб.: Основные проблемы электрофизиологии головного мозга. М.: Наука, 1974. С. 350—366.
41. Коган А. Б. Основы физиологии высшей нервной деятельности: учебник. М.: Высш. шк., 1988. 368 с.