

# АСИНХРОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ ЧАСТЬ II. СТАНОВЛЕНИЕ В ХАОСЕ – ОТ НЕЙРОНА К ДОМИНАНТЕ

А.В. Денисенко

*bp.denisenko@mail.ru*

Поступила 25.11.2018

Отказ от тотальной синхронизации, отсутствие памяти для хранения программного кода и законы сохранения порождают новые проблемы. Нейронная сеть рассматривается как на уровне одиночного нейрона, так и в виде её участка как очага возбуждения в соответствии с концепцией Доминанты. Рассматриваются некоторые математические особенности описания асинхронных нейронных сетей с непрерывными параллельными переходными процессами в телах нейронов и каналах связи. Сформулирована задача разработки программной среды для имитационного моделирования нейронных сетей предложенного класса. Приведены некоторые факты из истории проблемы.

*Ключевые слова – асинхронная нейронная сеть, доминанта Ухтомского, реконфигурация сети, интервальные числа.*

УДК 001(06) + 004.032.26(06)

DOI: 10.31145/2224-8412-2018-19-2-05-62

## **Введение**

### **Напоминания из Части I**

В первой части статьи были рассмотрены вопросы информационной ёмкости времени. Сравнивая особенности природных и компьютерных видов памяти, мы сформулировали цель как достижение хотя бы некоторых из перечисленных в тексте свойств нейронных сетей живых организмов. Важное отличие природных систем от алгоритмических концепций Тьюринга и фон-Неймана –

отсутствие программ, записанных в виде линейной символьной последовательности, а также процесса тотальной синхронизации переходных процессов в элементах сети. Каналы связи – ветвящиеся древовидные структуры, разделённые на фрагменты, что соответствует миелинизированным нервным волокнам. Входы нейрона – совокупность деревьев, связанных с телом нейрона через входные буферы, соответствующие синаптическим связям. Выходной канал нейрона начинается от буфера, аналогичного аксонному холмику. Процессы в сети – одновременное параллельное исполнение перемещения зарядов по каналам связи. Каналы – базовые элементы сети, как и нейроны (Рис. 1).

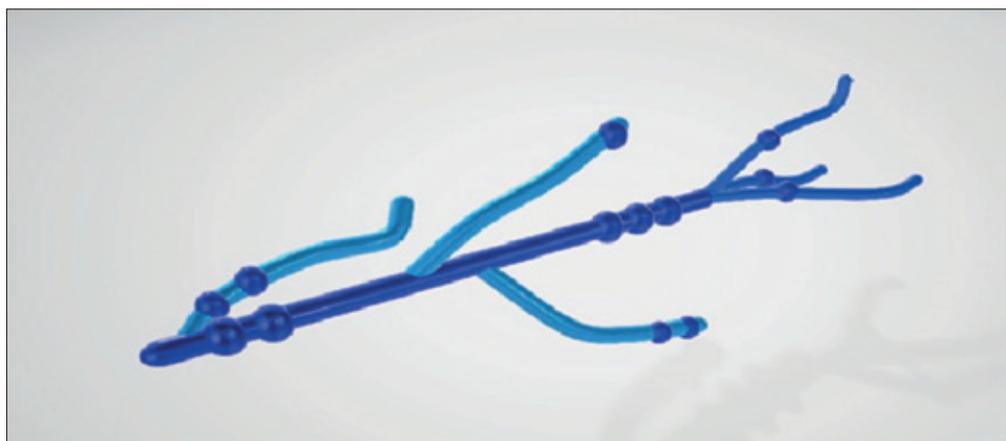


Рис.1. Аксон с иерархическими ветвями и движущимися по ним импульсами.

Мы показали, что в наборе каналов порядок следования импульсов во времени может считаться информационным содержимым громадной ёмкости. Предложена алфавитная кодировка совокупности информационных волн в участке сети. Дана количественная оценка предельной ёмкости такой совокупности каналов. В частности, высказано предположение о значительном уплотнении пространственной информации за счёт геометрических структур с возможностью последующей развёртки во времени, что наблюдается в хранении и передаче информации при порождении дочерней сети (Рис. 2).

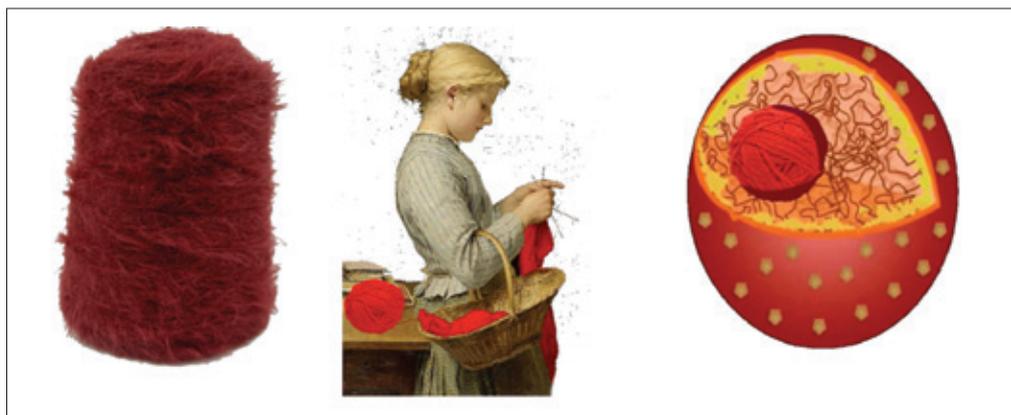


Рис.2. Упаковка молекулы ДНК в ядро клетки.

При обсуждении схемы алгоритмической машины Тьюринга и реализации фон-Неймана (машины 1-го рода) мы уточнили тезис Тьюринга трактовкой Дойча о том, что универсальность машины Тьюринга не распространяется на некоторые задачи, связанные с вероятностью и бесконечностью. В описании машины Тьюринга результатом считается завершение работы программы, кодирующей машину над заданным входным словом. Говорится, что машина применима ко входному слову. В более давней традиции вместо слова «остановка» использовалось слово «останов», что в обыденном смысле напоминает скорее «смерть». В быту слово «остановка» подразумевает дальнейшее движение после некоторого перерыва. В предлагаемом асинхронном подходе результатом считается формирование временной развёртки заданного класса на условленном участке нейронной сети. В отличие от машины Тьюринга заикливание асинхронной нейронной сети не считается отсутствием результата. Вообще говоря, тезис Тьюринга имеет важное прикладное отличие от схемы машины фон-Неймана 1-го рода. Машина Тьюринга не может зависнуть, она не имеет тупиков и блокировок.

Ещё один принципиальный момент – по возможности следование законам сохранения заряда в процессах циркуляции информации в нейронной сети, что в ряде случаев означает разрушающее считывание.

В качестве концептуальной системы понятий предложено использовать теорию Доминанты Алексея Ухтомского. Высказан тезис о том, что в модели асинхронной сети явления Доминанты дают основания надеяться на выполнение ряда свойств природных нейронных сетей.

В Части II продолжается разговор об асинхронном подходе к моделированию нейронных сетей и предложены варианты объяснения работы отдельного нейрона и фрагмента сети – вплоть до сети в целом. Сегодня трудно предложить для асинхронных моделей аналитические методы описания в виде дифференциальных уравнений. Пока можно говорить лишь о некоторых математических особенностях при описании объектов сети и некоторых эффектов их действия. Нет уверенности, что аналитические решения процессов, описывающих работу сети, вообще возможны без проведения серии вычислительных экспериментов. Под экспериментом мы понимаем компьютерные имитационные модели, на которых можно проверить эффективность тех или иных локальных алгоритмов срабатывания элементов и каналов. Этот этап впереди, мы лишь представим первые соображения о проведении таких экспериментов. По всей видимости, в некоторых разделах математики потребуются сравнительно новые постановки задач, предполагающие развитие известных инструментов или создание новых.

Неожиданным может показаться сближение точек зрения на отдельный нейрон и на фрагмент сети, вплоть до сети целиком. Процессы, описывающие работу отдельного нейрона, мы усложним; процессы, описывающие ра-

боту фрагмента сети, упростим. Нам сразу пригодятся два замечания Алексея Ухтомского – о динамике-статике, уровнях – этажах нервной системы и центра возбуждения. Такое сближение имеет дальнюю перспективу – использовать предлагаемые механизмы при описании систем, состоящих из совокупности отдельных самостоятельных систем – например, в задачах супрамолекулярной химии, эволюционной биологии или социологии, что выходит за рамки статьи.

### **Первые подсказки от Алексея Ухтомского**

Приведём несколько отправных цитат Алексея Ухтомского, связывающих две части текста.

**Динамика и статика.** «Было время, когда в самой механике полагали, что необходимо отправляться от статических данных системы, чтобы понять её динамику. Механика строилась от статики к динамике... Новая наука статику выводит из динамики... Вот и новой физиологии естественно освещать смысл морфологических данных из динамики вещества, а не наоборот». ([1], с.125).

**Уровни Доминанты.** «Нет никакой необходимости думать, что принцип доминанты приурочен исключительно к высшим уровням головного мозга и коры». ([1], стр. 7).

Хаос – это когда всё смешалось и невозможно понять, что откуда произошло и к чему движется. В Части I приведены два примера – с поросятами и сыщиком, показывающие информационную значимость порядка интервальных событий во времени. Там же приведена укрупнённая модель нейрона и каналов. Возникает вопрос о том, каким образом взаимный порядок импульсов можно передать по сети дальше через промежуточные объекты – нейроны, буферы, каналы или сохранять его хотя бы непродолжительное время, а также фильтровать входные импульсы по тем или иным критериям. Наблюдаемый хаос громадного количества импульсов, одновременно движущихся по сети, должен рано или поздно порождать детерминированную реакционную и адаптивную способность сети. Мы будем отдельно говорить о теле нейрона и каналах связи. Но при этом основа во всех случаях одна – мембрана с каналами, способными пропускать или не пропускать ионы снаружи внутрь и обратно.

Динамика электрических процессов в объектах сети состоит из трёх физических явлений – поперечных потоков ионов через мембраны каналов и тела, внутренних токов и индукции снаружи от мембраны. Говоря о динамике движения импульсов и статике временных состояний нейрона полезно вспомнить слова Алексея Ухтомского:

**Центры возбуждения или конstellляции на примере речевого центра.** «Поскольку этот единый центр оказывается не компактной массой клеток,

собранных в одном месте, мы вправе сказать, что перед нами рабочая констелляция. Так что центр рисуется не в виде локально очерченного участка, но в виде созвездия участков, расставленных между собою, быть может, довольно широко и объединённых не столько постоянными путями, сколько единством рабочего действия.»

### **Время живое и механическое**

Будем различать два основных подхода к отсчёту времени – классический и биологический. Классический, используемый в естествознании, основан на цезиевых часах. Математически это соответствует одномерной направленной оси. Ход такого времени в базовых единицах – секундах выражается натуральным числом. При этом базовая секунда потенциально бесконечно делима – на доли степени 0.1 – миллисекунда, микросекунда, наносекунда и т.д. В математическом анализе это сформулировал Вейерштрасс. Момент времени – это сечение или точка на оси, отделяющая прошлое от будущего. Более древние аналоги – например, маятниковые часовые механизмы от наручных часов с подзаходом до комнатных ходиков и курантов. Имеется строгая вложенность более мелких единиц в более крупные. Укрупнение цезиевой секунды обрывается обычно не выше суток. Дальнейшее укрупнение измеряется годами, веками, тысячелетиями и при близком рассмотрении неоднозначно измеряется такими секундами. Сколько цезиевых секунд в веке? Таймер компьютера при делении секунды на доли использует десятичную систему счисления, а при увеличении – двенадцатеричную и шестидесятиричную. Общественное сознание споткнулось на споре о начале миллениума, в котором победила не наука, а бизнес – миллениум отмечали дважды. Споры о наступлении нового года и календарях вообще относятся уже давно к социальным, конфессиональным и цивилизационным спорам. Когда меняются сутки для простого человека, слушающего московское радио? С каким ударом курантов – первым или последним? Во время перезвона. А это интервал, реально воспринимаемый нашим ухом, а не точка на временной оси.

В живых системах время образует кванты разного масштаба. Биологические процессы имеют суточные и годовые ритмы. Это означает, что те или иные равномерно происходящие события и процессы в организме периодически прерываются, то есть возвращаются в начальную точку, при исчерпании более крупной единицы времени. Петух подаёт голос, отсчитывая смену суток, медведь подводит итог за 365/366 петушиных побудок. В качестве внешнего «дедлайна» может выступать то или иное природное явление – суточный оборот Земли, фаза луны, оборот Земли вокруг Солнца.

В модельных экспериментах потребуется рассматривать атомарные или составные события нейронной сети в цезиевых единицах. Программное обеспечение унаследовало целый ряд проблем соответствия цезиевого и астро-

номического времени – календари, таймеры, типы данных, которые можно подробнее изложить при обсуждении проблем компьютерной реализации модельных экспериментов. Ниже при изложении специфики случайных величин мы ещё раз вернёмся к этой проблеме. Самая крупная единица живого времени – сама жизнь организма. Её дальнейшее укрупнение принципиально возможно лишь за пределами организма – в наследовании.

## **1. Планетарная модель нейрона**

### **Простейшие точки зрения на работу нейрона**

В Части I приведены основные черты концепции Коннектома. Это использование синхронных алгоритмов порогового срабатывания элементов, связанных попарно в виде ориентированного графа. Вершины графа – аналоги нейронов, рёбра – аналоги аксонов.

Коннектом имеет простые аналоги – представления водопроводчика и электрика. Для водопроводчика тело нейрона аналогично резервуару с несколькими кранами и одним сливным отверстием с клапаном. Когда уровень воды превосходит заданный порог, открывается сливной механизм и резервуар опустошается, возможно, не до дна. С точки зрения электрика тело нейрона – это конденсатор или изолятор. Если разность потенциалов на его пластинах (сторонах) превосходит порог, наступает пробой и определённая величина заряда перемещается по электрической цепи. Преимущество водопроводного представления – входы и выход несимметричны и их роли закреплены «аппаратно». Конденсатор или изолятор симметричны и их входы-выходы могут произвольно меняться ролями. В дальнейшем нам иногда будет удобно в иллюстративных целях использовать оба эти представления. Сильная сторона этих двух представлений, помимо наглядности, в выполнении законов сохранения. Пороговое срабатывание нейрона в обоих этих представлениях физически несложно объяснить как разность в давлении жидкости по обе стороны клапана или разность зарядов на двух пластинах конденсатора. Представления водопроводчика и электрика вполне приемлемо описывают ситуацию аксон-аксонной связи, то есть в отсутствие нейрона как такового.

Представления о нейроне как о жидкостной или электрической ёмкости наталкиваются на один редко упоминаемый момент – потенциал действия в аксоне зарождается не в точке его исхода из тела, а примерно в 50 мкм от него. Трудно объяснить, каким образом вода, вытекающая из ёмкости, возникает на каком-то расстоянии от сливного отверстия. Это говорит в пользу индукции снаружи от аксона и токов внутри него.

К простейшим представлениям о динамике процессов в нейроне могут служить пневмопочта и аэрохаб – подлетающие к аэропорту самолёты должны встраиваться в поток приземляющихся соседей и иногда покружить

в ожидании свободного окошка. Транспортная развязка на автодороге в простейшем представлении в чём-то аналогична по своей природе работе нейрона.

Из более сложных представлений отметим образ мыльных пузырей, занимающих часть пространства или замкнутой поверхности – это аналог поверхностной мембраны, где внешнее воздействие на один элемент-пузырь равномерно распространяется по всей поверхности или пространству, занимаемым множеством пузырей (см. литературу к Части I).

### Нейрон как однополюсная планета

Подробнее остановимся на более сложном представлении – посмотрим на нейрон как на однополюсную планету. Южным полюсом будем считать точку выхода аксона (аксонный холмик), если таковой есть (Рис. 3).

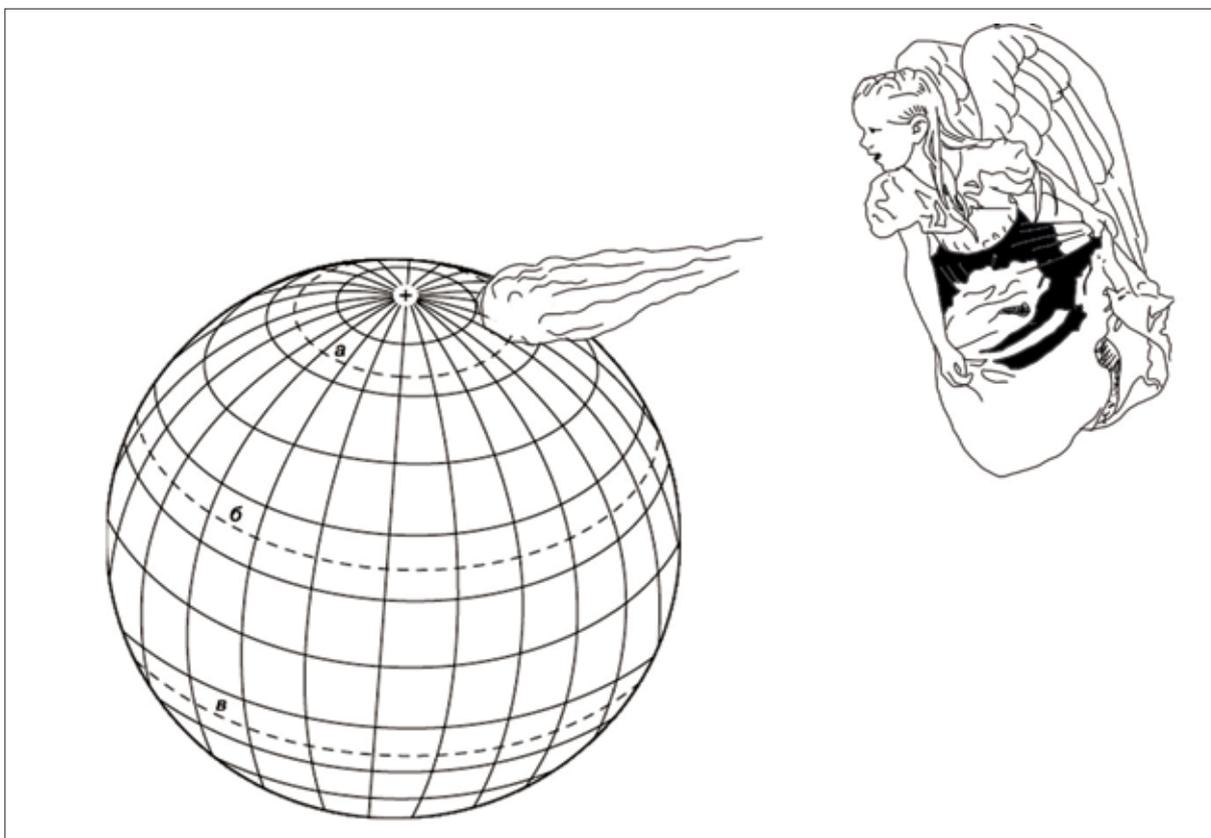


Рис.3. Нейрон как планета. а, б и в – последовательные положения волны от удара

*Отступление.* Выходного канала-аксона может и не быть, как и тела нейрона. В первом случае это в некотором смысле тупиковый нейрон, по существу – вспученный канал, задерживающий импульс на неопределённое время – до появления нового канала в ходе роста или реконфигурации сети. Отсутствие тела, то есть тела нулевой ёмкости, соответствует так называемой аксон-аксонной связи, или прямого крепления канала-источника в

принимающий канал. При реконфигурации сети и активном использовании такого соединения естественно предположить появление нового нейрона в такой точке. В то же время входы в нейрон есть всегда. Опустим рассмотрение и вообще факт существования изолированного нейрона.

Итак, посмотрим на нейрон как на планету. Пусть в северный полюс упал метеорит. От удара побежала расширяющаяся взрывная волна на юг. При взгляде с Севера это будет окружность растущего радиуса. В зависимости от мощности взрыва волна может иссякнуть на какой-то широте. Но в условиях динамической подпитки на местности, как в мембранной поверхности нейрона она может пересечь экватор и, уменьшаясь в радиусе, достичь Антарктиды. Если в конечной точке расположен аналог аксонного холмика, то произойдёт выброс импульса в околоземное пространство. Если аксонного холмика и аксона нет или он переполнен, или пришедший импульс недостаточен для его активации-пробоя, то собранный в Антарктиде импульс двинется на Север симметричным образом. Если следующий метеорит ударит в ту же воронку на Северном полюсе в интервале времени прихода отражённой первой волны, то ситуация повторится с усилением эффекта. Таким образом, наша планета работает как простейший механизм задержки импульса на заданное время, а также пороговый сумматор с распознаванием частоты падения метеоритов, то есть поступления импульсов в точку входа.

Начнём усложнять схему. Пусть есть две точки – источники одновременно возникших ударных волн. Одну из них условно назовём Семипалатинск, другую – Муруроа. Побегут две расширяющиеся волны. Для начала будем считать, что Земля плоская как в проекции Меркатора. Наши волны встретятся, например, в Месопотамии. И будет вторая точка встречи в другое время, симметричная первой на глобусе. Возникает проблема формирования результата встречи таких волн. В случае с привычными однородными материальными средами (твёрдое тело, жидкость, газ) результат может описываться различными дифференциальными уравнениями – теплопроводности, упругих колебаний, ударных столкновений, диффузии и т. д. Что происходит при столкновении таких волн на мембране? Как и для поверхностных волн в жидкости, физически не происходит перемещения материальных частиц в направлении движения волны. В чём принципиальное отличие мембранной среды от однородных физических сред? Перемещение ионов происходит поперёк поверхности мембраны. Важнейшее отличие мембранной поверхности от жидкости, газа или твёрдого тела – рефрактерность среды. После прохождения волны среда на некоторое время как бы выгорает.

Следуя позиции Лена и Уоддингтона (см. Часть I, и [2]), позволим себе отвлечься от физико-химической природы явления в реальном нейроне. Нас интересует информационная природа. Можно рассмотреть два крайних варианта формирования результирующей волны. Во-первых, это про-

стое суммирование амплитуд. При этом точка встречи станет источником новой волны, наследующей характеристики двух исходных. При этом неизбежна потеря исходной информации (далее мы покажем, что не всегда). Из известных математических инструментов описания одиночных волн можно вспомнить солитоны, о которых упоминалось в Части I. Это одиночные поверхностные волны в жидкой среде, описываемые дифференциальным уравнением третьей степени – уравнением Кортевега де Вриза в традиционной транскрипции. Форма такой волны не похожа на форму электрического импульса в нервной ткани, но с информационной точки зрения это не существенно. Солитон обладает таким важнейшим свойством как сохранение информации – при встрече двух солитонов каждая из волн продолжает движение в первоначальном направлении, с той же скоростью и той же формой, как бы проходя сквозь встречную волну, не замечая её. В природе это – цунами, которые хорошо изучены и описаны в одномерном или плоском варианте. Такого рода одиночная волна, формируемая серией подводных взрывов, предлагалась для разрушения небоскрёбов Манхэттена, но соответствующие расчёты в открытых источниках обнаружить не удалось.

В примере с двумя волнами как солитонами из Семипалатинска и Муруроа после их встречи в Месопотамии побегут продолжения обеих волн в первоначальных направлениях как будто каждая из них на поверхности планеты одна. Это и означает нужный нам эффект сохранения информации. Теперь более интересный вариант. Взрывы в двух точках происходят со сдвигом во времени. Тогда обе волны окажутся смещёнными и на поверхности – в зависимости от сдвига во времени их встреча может произойти в другой точке – в пустыне Негев, Гоби или в местечке Капустин Яр. И вообще для заданной точки формирования встречи – основания аксонного холмика нейрона можно подобрать такие диапазоны сдвига интервалов поступления входных импульсов, которые будут вызывать выброс из нейрона по выходному каналу. Нейрон становится распознающим механизмом для диапазона временных сдвигов входных импульсов. Одно замечание – если предположить, что планета не плоская что для нейрона пока никем не оспаривается, то точки встречи волн – две; вторая на обороте планеты – как Австралия для Англии. Поскольку аксон один, то вторая точка будет просто точкой сборки пары волн с последующим симметричным ответом.

В случае большего числа входов ситуация намного сложнее, причём в варианте солитонного описания результат более будет нагляден лишь в ходе имитационного моделирования. Планетарный взгляд на нейрон в состоянии объяснить и более интересный эффект – различие реакции нейрона на одинаковые импульсы, приходящие даже в одном и том же порядке по разным наборам одинаковых с виду каналов. Дело в том, что два одинаковых в понимании Коннектома точечных входа в планетарном представлении имеют

разные поверхностные координаты – поэтому и картина встречи волн может различаться. Если точка встречи волн не входит в область аксонного холмика, то они продолжают циркуляцию по поверхности на тот или иной интервал времени, тем самым сохраняя исторический след поступающей информации.

Отдельный импульс может изменить всю волновую картину на поверхности нейрона, тем самым динамически перенастраивая реакционную природу нейрона без материальной реконфигурации связей или физических характеристик – размеров, сечений, длин. Мы получаем на качественном уровне предварительное объяснение достаточно высокой избирательности и «интеллектуальности» одиночного нейрона.

Возможно, аналогична и природа так называемого дендритного потенциала действия, когда импульс, поступивший в тело нейрона, как бы даёт отдачу в дендрит – это может быть обратная волна, вернувшаяся от аксона при невозможности выброса через него. Если учесть, что поверхность дендритов может занимать до 97 процентов суммарной поверхности дендритов и тела нейрона, то дендритный потенциал действия, то есть волна, бегущая по дендриту, оказывается весьма значительным. Это же соотношение говорит о том, что в активном состоянии, когда открыт выходной канал, время прохождения информационного импульса через тело нейрона может быть совсем незначительным по сравнению с временами прохождения каналов связи между нейронами. Это ещё раз говорит о приоритете рассмотрения связей перед собственно нейронами.

Учитывая зоны рефрактерности, поверхность нейрона за непродолжительное время окажется в состоянии информационного насыщения, когда не останется щелей для проникновения вновь поступающих импульсов. Вспомним аэропорт. Это очевидно приведёт к торможению или замедлению входящих сигналов.

Поверхностные волны нейрона – это следы вошедших в него информационных сигналов, так что нейрон оказывается подобием капли или осколка зеркала, в котором отражаются предшествующие состояния участка сети, топологически близкого к данному нейрону. Сам нейрон можно считать сечением на оси времени. С одной его стороны до входов расположено прошлое, с другой после выхода – будущее относительно данной точки в пространстве-времени. Такой исторический отпечаток в теле нейрона можно трактовать и как число – сумму поступивших импульсов и как волновую картину.

Что происходит с импульсом, поступившим на вход, но недостаточным для преодоления экватора? Вообще говоря, он теряется, но может оставлять след в истории. В самом деле, ионы должны куда-то деться, например, в тело внутри мембраны. Смена концентрации ионов в теле нейрона влияет

на потенциалы на его поверхности (уравнение Нернста) и может повышать проходимость последующих входных импульсов. Это означает как бы разогрев тела и повышенную проводимость цепочек, проходящих через данный нейрон.

Нейрон, находящийся в активном состоянии, при котором выходной канал постоянно открыт для сброса излишков заряда, выполняет наиболее интересную функцию – он преобразует порядок поступающих сигналов во времени. Пусть сперва по первому входу поступил сигнал из двух импульсов, потом по второму входу поступил сигнал из трёх импульсов. Если второй вход расположен на поверхности нейрона значительно ближе первого, то на выходе мы получим инверсный порядок пары сигналов – сперва уйдут три импульса, потом ещё два. Таким образом, реакции нейрона в активном состоянии более детерминированы как в распознавании поступающей информации, так и в её преобразовании. Пока мы обошлись без синхронизации, рабочей памяти и программного кода.

Если говорить об аналитическом описании поверхностных волн в планетарной модели, то прежде всего надо помнить, что вместо производных следует говорить о разделённых разностях в силу отсутствия евклидовой метрики. Что может служить основой для прохода волн друг сквозь друга? Явление рефрактерности, когда сохраняется зависимость волны от удалённых точек. Если в уравнении Кортвега де Вриза используются третьи производные, то для поверхностных волн можно учитывать соседей на расстоянии не меньшем трёх. Основная трудность здесь – неопределённость физической природы поверхностной среды – это и не твёрдое тело и не жидкость и уж точно не газ. Ответ можно обнаружить или подобрать в имитационных моделях.

Почему у нейрона один полюс, а у астрономической планеты – два? Земля наша имеет ось вращения, а нейрон – нет.

## 2. Математические соображения

Теоретически – с точки зрения алгоритмической теории по Тьюрингу – асинхронность как таковая не выводит из класса алгоритмически решаемых задач. В статье о машине Кирдина [3] показана эквивалентность асинхронной системы традиционной машине Тьюринга. Жидкий мозг машины Кирдина можно рассматривать как нейронную сеть без каналов связи. Она работает исключительно на статистике – если долго трясти банку с деталями, то рано или поздно ключики-замочки встретятся. Но для асинхронной модели нейронной сети нам мало её способности свести входную последовательность букв к точке в случае применимости машины ко входному слову. Напомним из первой части нашего текста уточнение понятия алгоритма в расширенном тезисе Дойча. В нём не случайно упоминается бесконечность и

недетерминированность – как раз их мы встречаем в асинхронной модели предлагаемого типа. Бесконечность связана с соображением А. Ухтомского о природе времени в нейронной сети; недетерминированность вызвана статистической природой длительности времён переходных процессов.

### **Наноразмеры и большие числа (но не очень большие)**

Напомним масштабы основных физических единиц, используемых в практике изучения нейроструктур. Ангстрем, нанометр, микрон. 1 нанометр = 10 молекул водорода (по два Боровских радиуса каждая), уложенных «плотно» в одну линию. 1 Нанометр = 10 ангстрем. 1 микрон = 1000 нанометров. Вот порядки некоторых величин, характерные для природных нейронных сетей.

«Комплекс белковых субъединиц, образующих натриевый насос, имеет молекулярный вес около 275 000 и размеры порядка 6х8 нанометров, что несколько больше толщины клеточной мембраны. Каждый натриевый насос может использовать энергию, запасенную в форме фосфатной связи в аденозинтрифосфате (АТФ) для того, чтобы обменять три иона натрия внутренней среды клетки на два иона калия наружной среды. Работая с максимальной скоростью, каждый насос способен транспортировать через мембрану около 200 ионов натрия и 130 ионов калия в секунду. Однако фактическая скорость регулируется в соответствии с потребностями клетки. У большинства нейронов имеется от 100 до 200 натриевых насосов на квадратный микрон мембранной поверхности, но в некоторых участках этой поверхности их плотность почти в 10 раз выше. Типичный мелкий нейрон имеет, по-видимому, порядка миллиона натриевых насосов, способных перемещать около 200 миллионов ионов натрия в секунду» [4]. Длина аксона может достигать 1 м у человека и 4 метров у кита.

Это означает, что в сети даже из небольшого числа нейронов мы фактически имеем дело с весьма большими, иногда астрономически большими числами.

Почему и в каком смысле можно говорить о больших, но не очень больших числах? В неживой природе методы статистической физики, например, отклонения маятника под воздействием столкновений с молекулами воздуха ([5]), дают видимый Наблюдателем результат при числе молекул воздуха порядка числа Авогадро. Однако в живой природе, в частности в нервной ткани, устойчивые явления наблюдаются нами при числах на много порядков меньше – «всего» на миллиардах и миллионах объектов.

### **Математические особенности в компьютерной модели**

Сегодня мы не можем предложить убедительного аналитического описания разнообразия процессов в асинхронной сети с элементами предложенной

структуры и геометрии. Полноценно вырабатывать такие математические инструменты можно на основе компьютерных экспериментов с различными вариантами алгоритмических решений локального уровня. Даже по предварительным оценкам необходимые имитационные модели для достаточно большого числа элементов и связей для сбора убедительной статистики результатов потребуют очень больших компьютерных ресурсов. Обсудим лишь некоторые математические вопросы, возникающие уже на этапе постановки задачи проведения масштабных вычислительных экспериментов.

### **Аналогово-цифровой дуализм**

В компьютерных моделях необходимы как аналоговый, так и цифровой подходы, что замечал и фон-Нейман – см. Часть I. Аналоговая природа импульсов проявляется в безоболочных каналах и поверхности нейрона. Приёмы и методы математики непрерывных величин и функций необходимы в статистических выводах. Дискретная природа импульса проявляется в оболочных миелинизированных каналах, а также в пороговом срабатывании нейрона. В Части I выбраны оболочные каналы с дискретными точками – перехватами Ранвье, чтобы иметь свободу использования методов дискретной математики.

Математическое моделирование может выглядеть как дифференциальные и интегральные уравнения или булевские функции. В обоих случаях хочется получить какие-то глобальные характеристики поведения объекта или процесса через известные законы локальной природы. Например, уравнение колебаний струны – через законы Гука между очень маленькими соседними участками материала. Для нейронной сети нас будут интересовать процессы и реакционные способности системы как алгоритмические результаты локальных событий в нейронных телах и каналах связи между ними. Сочетание обоих подходов наиболее заметно в использовании вероятностных и статистических методов в описании сети.

### **Модель Ходжкина-Хаксли и уравнение Нернста**

Наиболее распространённое аналитическое описание процессов ионного обмена через клеточную мембрану – модель Ходжкина-Хаксли и несколько уравнений, связанных с именем Нернста. Суть в том, что поверхностный потенциал состояния покоя на мембране определяется разностью логарифмов концентраций ионов по разные стороны мембраны. Более строго эти величины надо сложить для всех положительных ионов (натрий, калий, кальций, магний) и вычесть значения для отрицательных ионов (хлор).

У этих представлений есть ряд ограничений. Прежде всего, соотношение получено для плоской мембраны в условиях фиксированных концентраций ионов по разные её стороны. В случае нервной ткани это справедливо для

непосредственной окрестности мембранного канала внутри и снаружи клетки. Нет и достаточной уверенности, что механизмы в нервной ткани муравья, человека и кальмара совпадают.

«Теория мембранных потенциалов покоя для аксона разработана Гольдманом, Ходжкином, Хаксли и Катцем. Основное предположение этой теории состоит в том, что напряженность электрического поля внутри тонкой мембраны должна иметь постоянное значение, и ионный транспорт в мембране можно описывать уравнением Нернста – Планка. Однако этот подход не представляется реалистичным, поскольку ионы проходят сквозь мембрану через каналы, селективные для данных ионов. При переносе через канал молекулярных размеров трудно говорить о диффузии, ионы как бы перепрыгивают через мембрану, преодолевая соответствующий энергетический барьер» ([6] стр.234).

Есть и более общий вопрос о применимости аппарата термодинамики к мембранным обменным процессам. В уравнениях Нернста фигурирует универсальная газовая постоянная  $R$ , характерная для процессов хаотического столкновения молекул газа при заданной температуре. Но ионные потоки через мембранные щели нейрона скорее напоминают манипуляторы, захватывающие пару ионов калия и три иона натрия с их последующим обменом. Своего рода захват с переворотом и сброс. При этом расходуется энергия, периодическое исчерпание и восполнение которой отражается в явлении рефрактерности.

Оценки потоков ионов через мембрану при фиксированной концентрации ионов внутри тела нейрона и снаружи от него могут использоваться по крайней мере при отсутствии входов и выходов, когда нейрон только что зародился. Уравнения Нернста и аналогичные ему ([7],[8]) в рамках асинхронного подхода можно будет проверить при компьютерной имитации.

### **Интервальные числа, размытость и эластичность**

Это следствие аналогово-цифрового дуализма. Форма нервного импульса имеет довольно сложный вид и может с некоторым приближением описываться аналитически. Но для компьютерной модели часто целесообразно использовать дискретные механизмы, заменяя кривую ступенчатой функцией. В силу физических свойств границы перехода электрических характеристик с одного уровня на другой оказываются размытыми. Применительно к нейрону шкала наблюдателя – это чувствительность рецептора или принимающего элемента, например, ёмкость его входного буфера. Интервальная арифметика и более широко – интервальный анализ сегодня достаточно распространены и признаны в качестве стандарта. Для вещественных чисел  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$  арифметические операции над ними определяются так

Сложение:  $[a,b] + [c,d] = [a + c, b + d]$

Вычитание:  $[a,b] - [c,d] = [a - d, b - c]$

Умножение:  $[a,b] \times [c,d] = [\min (ac, ad, bc, bd), \max (ac, ad, bc, bd)]$

Деление:  $[a,b] / [c,d] = [\min (a/c, a/d, b/c, b/d), \max (a/c, a/d, b/c, b/d)]$

В квадратных скобках стоят границы интервалов.

В нашем случае ситуация сложнее – интервалами оказываются сами границы интервалов. Тавтологию надо пояснить. Импульс в дискретном представлении имеет ступенчатую форму и в большинстве случаев – трапециевидную (Часть I). Боковые стороны трапеции соответствуют переднему и заднему фронтам волнового импульса. Длительность импульса и является интервалом с размытыми границами – временами переходных периодов между уровнями. То есть наш импульс имеет базовую минимальную длительность плюс-минус некоторый разброс. Мы будем считать, что разброс времени переходных процессов одинаков для переднего и заднего фронтов, хотя это некоторое упрощение, но главное допущение – распределение длительностей переходных процессов как случайная величина задаётся одной и той же функцией в силу единой физической среды.

Здесь и порождается хаос. Порождается в каждом буфере, каждом теле каждого нейрона и каждой ветви и точке ветвления каждого канала и каждого сегмента между перехватами Ранвье. Если рассматривать пучки каналов (см. Часть I), которые соответствуют олигодендрцитам природной нейронной сети, то хаос порождается и в них.

Ещё раз признаем, что самый простой и эффективный способ подавления такого хаоса – синхронизация. Наша сверхзадача – обойтись без неё.

Интервальность связана ещё с двумя особенностями, которые описывают процессы в нейронной сети. Это размытость состояний и областей – очагов возбуждения. Наиболее наглядный аналог – пятна на Солнце. Области активности даже в сравнительно небольшие интервалы времени не могут быть чётко выделены – их границы размыты и зависят, в частности, от шкалы Наблюдателя. В имитационной модели это уточняет процедуры обнаружения Доминанты – её границы могут колыхаться в процессе обнаружения. С точки зрения формальной логики интервальность вместе со статистикой и геометрией сети даёт некоторое основание для оценки вероятностных значений, которые, например, в теории вероятностных автоматов, считаются априорными.

Вторая особенность – своеобразная эластичность объектов сети. Такой параметр тела нейрона, как его электрическая ёмкость, удобно считать также интервальной величиной. То есть при поступлении импульса в тело, которое находится в заполненном состоянии, он всё-таки может быть добавлен в определённых пределах. Принятие свойств упругости значительно усложнит описание модели, вполне достаточно лишь эластичности и дополнительной индикации такого перегрева или переполненности, что должно быть учтено при реконфигурации сети.

## Состояние нейрона как число и разложение сумм

В простейших представлениях состояние нейрона выражается целым числом, формируемым как сумма входных импульсов. Казалось бы, при суммировании уже теряется такая информация как происхождение этой суммы, то есть слагаемые. И здесь первый математический парадокс нашей сети. Напомним, что входные импульсы буферизуются, то есть поступают дозами – квантами. Пусть нейрон имеет два входа. Ещё раз напомним, что все величины зарядов в наших моделях – большие целые интервальные числа. Отвлечёмся пока от интервальной природы – рассмотрим суммы пар больших целых чисел. Ещё напомним, что все объекты в наших моделях различны с точностью до шкалы Наблюдателя. Для малых чисел, например, 3 и 5 в качестве ёмкостей входных буферов можно заметить следующее. Число 11 в качестве суммы могло получиться только при двух импульсах по 3 единицы первого входа и одном импульсе величины 5 второго входа.

Теперь более общее утверждение. Для пары буферов большой и разной ёмкости по сумме поступивших импульсов «почти всегда» можно восстановить слагаемые, то есть количества импульсов, поступивших по каждому из входов. Можно привести небольшую табличку для пар случайных больших чисел. Особенность чисел – они большие, как число перемещающихся ионов и разные. В частности, это означает отсутствие чисел с нулями справа; число 12300 – это 123 по более крупной шкале. История нуля – это переход к более крупной единице измерения.

Учитывая, что ёмкости входных буферов сравнимы по порядку с ёмкостью тела, можно ограничиться небольшим диапазоном кратности.

Математически задача для пары слагаемых (два входных буфера) выглядит примерно следующим образом.

Даны целые числа  $C_1$  и  $C_2$  (ёмкости входных буферов). Рассмотрим их кратные суммы, то есть числа вида  $K_1 * C_1 + K_2 * C_2$ , не превышающие некоторой величины  $S$  (ёмкость тела нейрона). Утверждается, что при небольших значениях  $K_1$  и  $K_2$  (число импульсов в серии, поступившей по входу 1 и 2 соответственно) они устанавливаются однозначно в значительном большинстве случаев.

Этот феномен будет теряться при уменьшении диапазонов слагаемых, то есть с укрупнением шкалы Наблюдателя, а также при одновременном увеличении числа входов. Это означает совпадение объектов при заданной шкале и соответствует эффекту классификации – распознаются уже не входные величины, а их естественные классы.

В этом важное отличие нашей схемы от водопроводного или конденсаторного представления – суммируемые величины при увеличении точности шкалы Наблюдателя сохраняют свою индивидуальность при слиянии в теле нейрона. Что выступает шкалой в нейронной сети? Это ёмкости буферов

принимающих нейронов. Они задают порог чувствительности принимающей стороны. Таким образом, при измельчении шкалы объекты, относящиеся к одному классу, оказываются в разных классах или становятся индивидуальными.

### **Серии испытаний по Бернулли и по Чебышёву**

Серии испытаний случайных величин возникают в связи с иерархией природного времени в живых системах. В отличие от атомных часов, организм имеет заданные извне временные кванты – ритмы длительностью в сутки, месяц, год. Внутренние ритмы нейронной сети могут иметь и более сложную природу. Вопрос – каким образом с течением времени хаотичность происходящих в сети процессов может не расти, а падать, формируя тот или иной порядок. Мы уже говорили об интервальной природе чисел, которыми характеризуются основные события в сети. В процессе работы сети эти числа многократно складываются – при формировании импульса из процессов ионного обмена в мембранных каналах, при продвижении импульса по сегментам и перехватам, при многократном проходе импульсов по замкнутым контурам каналов сети. В общем случае интервальные числа неудобны тем, что границы таких интервалов могут катастрофически расширяться при арифметических операциях, начиная с суммы. В нашем случае выручает статистика. Пусть мы имеем серии по 1000 испытаний с подбрасыванием правильной монеты. Согласно Бернулли, мы наберём около 500 баллов, если орёл и решка имеют значения 0 и 1. Наличие иерархических квантов живого времени позволяет нам говорить о конечных сериях испытаний. У нас нет уверенности в симметрии монеты. Мы не будем углубляться в тонкости статистической теории, но важнейшее соображение таково – если переходные процессы являются случайной функцией одной природы, то не имеет значения вид этой функции. В достаточно длинной серии испытаний мы можем быть уверены в сходимости суммы случайных величин в пределах серии к её матожиданию умноженному на число испытаний. Простой пример. Пусть в серии из 1000 испытаний участвует кривая монета как в игре Кардинала из Части I, а вероятность выпадения сторон монеты разная, и матожидание выпавшего числа – не 0.5, а 0.7. Тогда мы можем уверенно ожидать суммарного значения в 700 после тысячи подбрасываний. Это закон больших чисел согласно Чебышёву. Что даёт нам уверенность в постоянстве распределения величины разброса времени одиночных переходных процессов в сети? Это единая физико-химическая природа нервной ткани.

Теперь рассмотрим следующий уровень иерархии времени. Если мы рассмотрим достаточно большое повторение серий наших испытаний, то статистика имеет два важных для нас варианта – поведение средних значений сумм и поведение экстремальных значений таких сумм. Если с ростом чис-

ла испытаний средние значения сумм из 1000 испытаний будут всё больше приближаться к 500, то поведение максимально достигнутых отклонений будет монотонно возрастать или, по крайней мере, не убывать. Пусть в первой серии мы получили величину 510. В серии из двух серий по 1000 максимально достигнутое значение не может быть меньше 10, но с большой вероятностью окажется больше – например, 17, если одна из серий набрала 517. И так далее.

Хаос в сети определяется прежде всего средними значениями случайных величин. Таковы матожидания времени обмена 100000 ионов через мембранный канал, таково время прохождения импульса по замкнутому контуру 1000 раз и т. д. Необходимо помнить о тканевой среде, то есть материальной природе сети и её окружения. А здесь может иметь значение как раз экстремальное отклонение. Например, даже разовое расхождение времён пары процессов может вызвать смену их порядка во времени, привести к пороговому срабатыванию и каскадной реакции возбуждения или торможения. Вообще говоря, жизнеспособность сети ограничена экстремальными значениями отклонений времен переходных процессов. Спасение от такой деструкции – в иерархии циклов времени и размеров серий испытаний. Петушиный крик может отклоняться ежедневно на несколько минут, но в пределах одного пробуждения медведя от зимней спячки – после этого отсчёт начинается сначала. Участок сети может исправно работать в пределах определённого времени, после чего он начнёт сбоить и требовать передышки – отдыха или сна.

Самым крупным квантом времени в живой системе оказывается сама жизнь сети или организма. При этом единственный способ возобновления серии испытаний переходных процессов при их чрезмерном отклонении – это воспроизводство сети или организма через порождение дочерней системы, то есть наследование.

Вспомним пример про боулинг Кардинала из Части I. Глубина следов от шара соответствует средним значениям траекторий. А если представить себе ряд кеглей, выстроенный поперёк бросков, то ширина просвета от сбитых кеглей будет соответствовать максимальным отклонениям от средних значений. Средние значения можно использовать для оптимизации будущих результатов, например, заранее углубляя их след; максимальные отклонения покажут опасность, которую броски могут представлять при достаточно длинной серии для того, кто окажется не в нужное время в не совсем нужном месте.

### **Разложение функций**

Для представления электрических импульсов и волн традиционно используются ряды из периодических функций, обобщенно именуемых рядами Фурье. Ряд Фурье в узком смысле – разложение периодической

функции в линейную комбинацию синусов и косинусов кратных углов. Этому уделяется большое внимание во многих разделах прикладной математики, для хранения, передачи, фильтрации, распознавания и восстановления сигналов в системах связи. Алексей Ухтомский, убедившись в периодической природе нервных импульсов, уделял этому настолько большое внимание, что даже специально изучал соответствующие разделы математики. К сожалению, в те годы не было развитого дискретного анализа, как и вообще широко известных приёмов дискретной математики. Даже работы Джорджа Буля по двоичной логике выглядели лишь умозрительными построениями. Не будем нагружать читателя историей возникновения и тотального доминирования дискретных методов. Приведём небольшую поучительную историю, касающуюся как раз разложения сигналов в базовые функции. Дело в том, что определение коэффициентов при синусах и косинусах в разложении сигнала в ряд Фурье оказывается довольно трудоёмкой задачей, связанной с вычислениями определённых интегралов. Примерно до 70-х годов прошлого века так и поступали – были разработаны разнообразные алгоритмы программного уровня, которые занимали ощутимое время. Это особенно критично было в задачах распознавания, и особенно – в радиолокации и бытовой видеоаппаратуре. Парадоксальным оказался подход немецкого учёного Хармута [9], который отказался от использования синусов и косинусов в качестве базовых функций в разложении сигнала. Сам он вспоминает, что выступил на одной солидной конференции с предложением использовать в качестве базиса набор из функций, неинвариантных к сдвигу – и его любительский магнитофон сохранил реакцию зала на такую идею. Каково же было изумление коллег, когда через небольшое время Хармут предъявил научному сообществу и серийной промышленности небольшую электронную плату, которая выполняла сотни тысяч разложений сигналов в секунду фактически без программного обеспечения – на уровне схемной микросхемной реализации. Хармут использовал функции Уолша-Радемахера, которые представляют собой дискретные ступенчатые двоичные функции, удовлетворяющие формальному понятию ортонормальности. Через несколько лет системы радиолокации и бытовой электроники стали переходить на решения подобного типа. Это говорит о важности выбора такого функционального базиса в представлении наших сигналов, который позволит обходиться механизмами схемной реализации, не прибегая к программированию. Почему нам не использовать подобные функции, как это сделал Хармут? Дело в том, что наши сигналы в ветвях аксонов не просто периодичны – их специфика в том, что они имеют вложенные циклы и сами по себе имеют очень длинные периоды или не имеют их вообще – на том или ином уровне шкалы Наблюдателя. С другой стороны, мы могли бы

отказаться от требования ортонормальности базисных функций. Ортонормальность базисных функций предполагает их ортогональность, то есть независимость друг от друга. Ортонормальность обеспечивает единственность разложения сигнала в комбинацию базисных функций. Что может означать отказ от ортонормальности в нашей модели? Это означает неоднозначность восстановления исходного сигнала по совокупности базовых функций. Как и в случае неоднозначного разложения числовой суммы на совокупность слагаемых, это означает разбиение входных объектов на классы эквивалентности, то есть наряду с появлением одной проблемы получаем автоматическое решение другой – вариант естественной классификации входных сигналов!

### **Покрытия поверхности, выбор системы координат**

Рассматривая процессы на поверхности нейрона, необходимо договориться о системе координат. Поскольку мы считаем, что аксон один, то можно его принять за полюс, например, южный. Противоположную точку на поверхности сферы можно в этом случае считать северным полюсом. С широтой ясно. С долготой, то есть нулевым меридианом и направлением отсчёта немного сложнее. За нулевой меридиан можно взять окружность, проходящую через первый появившийся вход, а направление отсчёта долготы принять в соответствии с правилом буравчика. Другой вариант – если в начальный момент мы не можем определить, какой из входов является первым, можно взять геометрический центр многоугольника, образованного имеющимися входами.

Если считать тело нейрона сферой, то покрытие его координатной сеткой – непростая задача. По известной теореме Эйлера это нельзя сделать одними шестиугольниками, потребуются также пятиугольные или треугольные вставки. Но в нашем случае всё немного легче – нейрон по природе *корявый*, то есть может быть покрыт чем угодно. Выбор способа покрытия, то есть фигур, сплошь покрывающих его поверхность, может быть принят в каждой конкретной модели в зависимости от удобства разработчиков.

### **Форма импульсов при их встрече/ветвлении/слиянии**

Форма импульса в канале не очень важна, если канал оболочный – это возникающие и исчезающие горячие точки в перехватах Ранвье. Достаточно принять тот факт, что скорость их распространения определяется поперечным сечением канала. Можно принять какую-то единицу этой скорости для условно единичного сечения канала, а все остальные каналы измерять в этих единицах, тогда импульсы будут измеряться в единицах скорости. Если важна форма импульса на поверхности тела и в дендрите, то придётся принять несколько решений – каким образом порождается

форма импульса при его приходе из точки входа на поверхность, как она преобразуется при распространении по поверхности тела и на выходе в аксон, а также, что происходит с импульсами при их встрече.

Если исходить из монотонной зависимости скорости импульса от сечения, то можно условно аппроксимировать сферу набором соприкасающихся цилиндров разного диаметра. Скорость импульса в первой полусфере будет монотонно возрастать, а после экватора – падать. Можно также считать, что процессы выхода импульса из входного канала в тело нейрона и выброса его через аксонный холмик симметричны по алгоритмической природе, происходит лишь смена частоты (дозировки).

Вопрос о результате столкновения импульсов на поверхности мы уже обсуждали, здесь есть свои аргументы в пользу разных вариантов. Одно дополнительное соображение можно высказать в русле законов сохранения зарядов. Импульс, распространяющийся по поверхности нейрона в виде волны, должен иметь постоянное значение интеграла заряда. При изменении скорости волны естественно ожидать её размывания при движении от входа до экватора и обратного уплотнения после экватора.

### **Автоволны и солитоны**

Электрические явления в нервной ткани по большей части получены при исследовании аксона большого кальмара, который имеет видимое невооружённым глазом сечение до нескольких миллиметров. Заметим, что крупные млекопитающие – слон, жираф, кит имеют ещё более крупные нервные волокна. Нет уверенности, что процессы в аксоне большого кальмара универсальны для любых природных нейронных каналов и тем более сетей.

Известны несколько разных математических представлений и методов описания волн в различных средах. Мы обсудим два наиболее интересных варианта – так называемые автоволны [10] и солитоны [11].

Автоволна – это распространяющийся процесс возбуждения в среде, поддерживаемый энергией локальной природы – то есть того места, в котором в данный момент находится волна. Вообще говоря, этот процесс характерен для тканевой среды организма – прежде всего мышечных волокон. Такими методами описывают модели сокращения сердечной мышцы. Отличительный признак процессов распространения таких колебаний и волн заключается в том, что они при столкновении не интерферируют, то есть не складываются по амплитуде, а скорее взаимно гасятся. Иногда для них приводят такую аналогию, как процесс горения – две волны горящего шнура или пороховой дорожки, идущие навстречу друг другу, исчезают при соприкосновении – впереди у каждой из них выжженная область предыдущего прохода встречной волны.

Внешнее электрическое или химическое воздействие распространяется по нервному волокну в обе стороны. В то же время по аксону сети импульс, как правило, движется в одном направлении. Как это можно объяснить? Вспомним про период рефрактерности – когда за импульсом на некоторое время деактивируется участок канала. Если рассмотреть импульс в некоторый момент времени, то ему ничего не остаётся как продвигать вперёд, так как сзади – выгоревший в некотором смысле участок, или уставший. Это не похоже на автоволны и горение. Сгоревший участок бикфордова шнура не восстанавливается. Есть и более сильное возражение. При движении нервного импульса по оболочному каналу возбуждение может передаваться не только на соседний перехват, но и проскакать через несколько сегментов – от 2 до 5. Можно предположить, что это вызвано как внутренними токами в канале, так и индукцией снаружи. Наконец, при выбросе из аксонного холмика возбуждение по какой-то причине зарождается не прямо в точке выхода канала из тела нейрона, а на расстоянии в несколько нанометров от его основания. Это, кстати, не соответствует водопроводному представлению о динамике нервных импульсов.

Солитон может представлять собой одиночную волну или расщепиться на серию из нескольких подряд идущих волн. Солитон описывается дифференциальным уравнением третьей степени, то есть значение функции в каждой точке области возбуждения зависит от значений этой функции не только в соседних, примыкающих непосредственно точках, а и от значений в точках, отстоящих на две и три единицы. В принципе, это может обеспечивать перескок через область рефрактерности или через несколько соседних перехватов.

Привлекательность солитона как инструмента описания поверхностных волн заключается ещё и в том, что в этом предположении в каждой точке поверхности результат от совокупности волн определяется совсем просто – расстояниями от точек входа в поверхность нейрона.

Ещё один аргумент против описания типа горения шнура. Распространение нервного импульса имеет пороговую природу – нужен минимальный уровень заряда, чтобы он возник. В то же время процесс горения одинаков по своим последствиям от брошенного в лесу окурка или разлитой цистерны топлива. И, наконец, угасающий в сети импульс всё-таки приводит к накоплению возможности возбуждения в дальнейшем, что скорее соответствует электрической или водопроводной схеме срабатывания.

Из уравнения Нернста сложно судить о продольном направлении и параметрах движения импульса.

Что касается однонаправленного продвижения импульса в канале, то в ряде случаев он может нарушаться. Примером может служить динамика распространения дендритного потенциала действия.

## **Сохранение и смена порядка событий во времени**

Относительный порядок импульсов во времени сохраняется или изменяется в каналах и теле нейрона по-разному.

Порядок следования импульсов в параллельных каналах может сохраняться или меняться в зависимости от ряда факторов. Прежде всего, напомним, что скорость движения импульса в канале определяется его сечением – пропорционально диаметру или корню из диаметра сечения ветви, в зависимости от наличия или отсутствия оболочки. Это означает, что есть предельная длина канала, при которой порядок следования импульсов будет сохраняться. Начиная с какой-то длины, более поздний импульс в более толстом канале опередит импульс, предшествующий по времени появления, но идущий по более тонкому каналу. При этом соотношение длин в определённых пределах может обеспечивать как сохранение исходного порядка следования импульсов, так и его преобразование по заданному алгоритму.

Что касается тела нейрона, то природа может быть другая. В активном состоянии нейрон будет сохранять или изменять порядок следования импульсов от дендритов в аксон, в зависимости от относительного порядка координат крепления входов к поверхности тела. Это пример влияния физической тканевой структуры нервной сети на информационные преобразования. Более точно – всё может определяться относительными длинами кривых, соединяющих точки входов и выхода на поверхности нейрона. Мы ещё раз вернёмся к этому эффекту в разделе о корявости нейрона.

Можно ли предположить при построении сети отсутствие нейронов (могут ли нейроны вообще не быть)? Если считать тело нейрона своего рода вспученным сегментом канала, то оно просто добавляет механизмы более сложной задержки импульсов. У простых видов организмов нервная сеть довольно эффективно работает на основе глиальных клеток и каких-то, не очень понятых физико-химических процессов. Явления временной задержки может быть реализовано пучками связанных волокон. Важным отличием от игры Дж. Конвея служит наличие развитых дальних – не локальных – связей. В этом случае понятие соседнего элемента не означает физическую и геометрическую близость. (Напомним, что игра Конвея моделирует динамику поведения клеточной среды, в которой взаимодействуют только соседние клетки, непосредственно контактирующие своими гранями).

### **3. Очаги активности и Доминанта**

#### **Очаговая активность – от протуберанца к Доминанте**

Пока особенности асинхронной сети рассматривались как бы снизу, на уровне ионных каналов мембран, отдельного нейрона, канала, серии одиночных импульсов. Информационное содержимое памяти или реакционная способность нейронной сети определяется не одиночными нейронами с их непосредствен-

ным окружением по входам и выходам, а их довольно большими группами, областями, зонами, возможно не связанными физическими отношениями соседства.

Попробуем посмотреть на нейронную сеть «сверху» (Рис. 4). На каком-то уровне мы можем достичь встречи этих подходов, хотя гарантии такой нет.

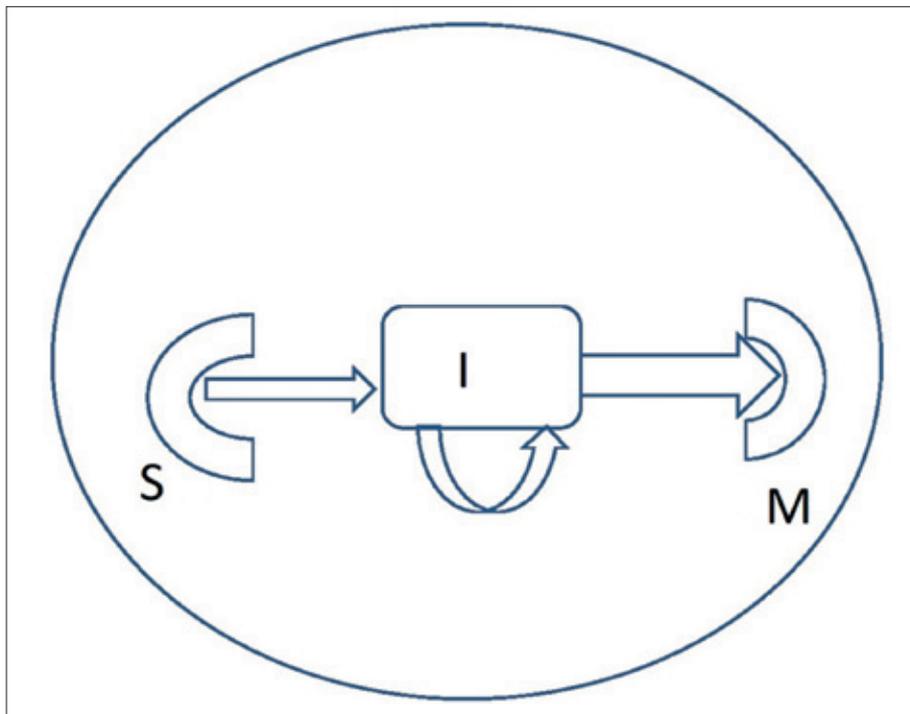


Рис. 4 Сеть без Доминанты. Основные части нейронной системы. Сенсорная (S), Моторная (M) и интернейронная (I).

### **Алексей Ухтомский:**

«Большинство современных ученых, считающих механический метод за нормальное требование естествознания, не предполагают, впрочем, что животный организм и на самом деле есть машина, или механизм, а только думают, что физиолог должен подходить к предмету своего изучения так, как если бы он был механизм. Странное раздвоение мысли здесь в том, что хоть на самом деле оно и не так, но будем все-таки думать, будто это так, ибо это кое для чего полезно.

Вместо таких ухищрений, конечно, естественно и правильно, однажды поняв, что организм не есть механизм, так и говорить, что он не механизм и не как механизм должен изучаться, но он всегда способен вырабатывать в себе механизмы, и одна из очередных и реальных задач физиологии в том, чтобы уяснить условия, как в организме вырабатываются механизмы, т.е. как и при каких данных немеханические зависимости, управляющие событиями в ткани и органе, превращаются в полносвязные механические приборы» .

На рис. 5 схематически показаны области Доминанты входов и выходов нейронной сети.

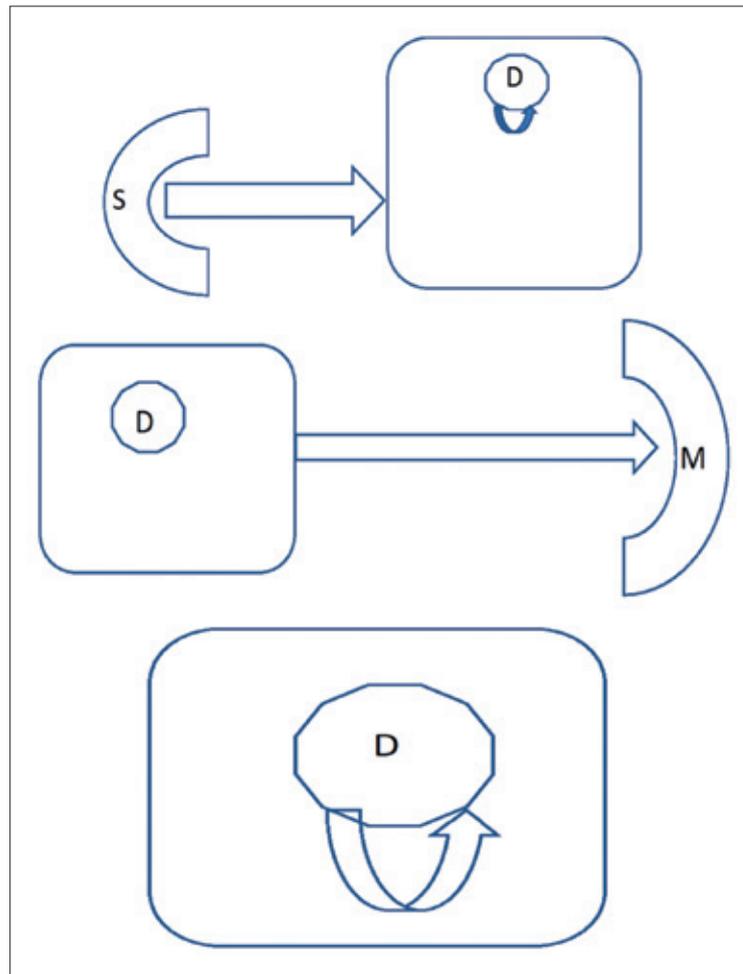
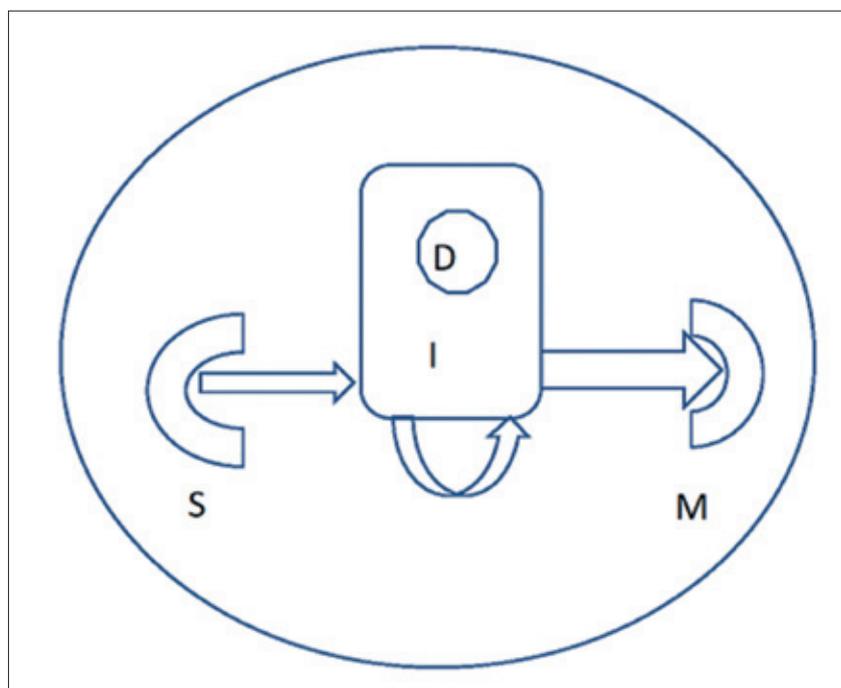


Рис. 5. Вход (S), выход (M) и Доминанта (D). На нижнем рисунке Доминанта подпитывает сама себя.



На Рис. 6 схематически показан фрагмент сети с доминантой.

Рис. 6. Сеть с Доминантой. Доминанта (D)– часть интернейронной системы (I), изображена многоугольником.

«Нет никакой необходимости думать, что принцип доминанты приурочен исключительно к высшим уровням головного мозга и коры» ([1], стр.7]). Это даёт нам основания считать, что теория Доминанты может быть приложима к произвольному фрагменту нейронной сети.

Доминанта в физиологии – временно господствующий рефлекс, которым трансформируется и направляется для данного времени, при прочих равных условиях, работа прочих рефлекторных дуг и рефлекторного аппарата в целом». Это определение также принадлежит А.Ухтомскому.

«Нормальное отправление органа (например, нервного центра) в организме есть не predetermined, раз навсегда неизменное качество данного органа, но функция от его состояния... приписывание топографически определенному нервному центру всегда одной и той же неизменной функции есть лишь допущение, делаемое ради простоты рассуждения» ([12], стр.5-6).

«Главенствующее возбуждение организма в данный момент существенно изменяло роль некоторых центров и исходящих из них импульсов для данного момента» [12], стр.6).

На рис. 7 показана основная роль Доминанты.

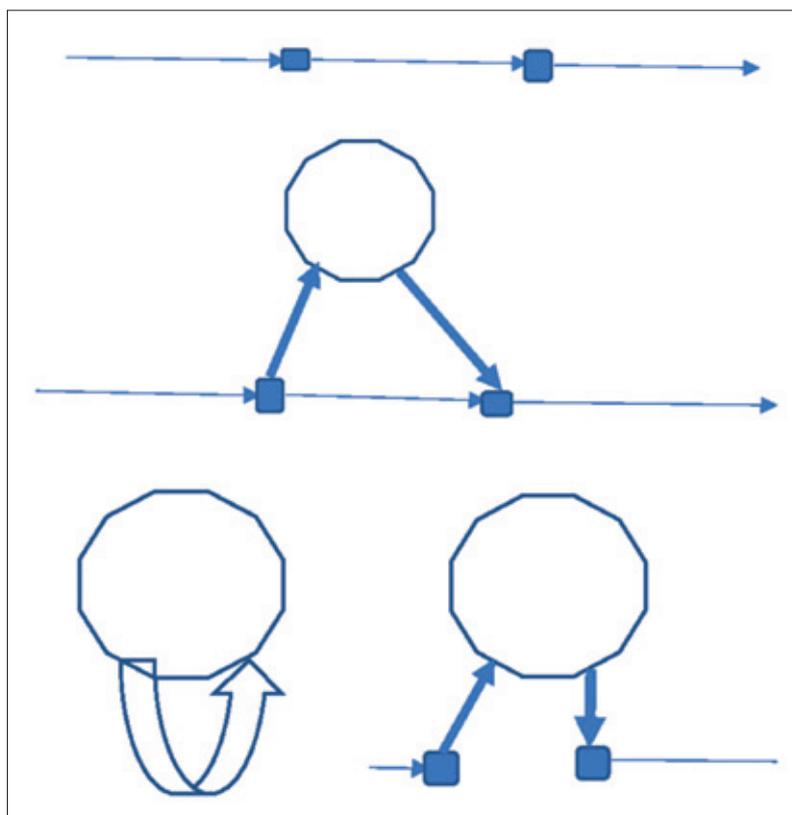


Рис. 7. Перехват управления Доминантой.

Первоначально импульс, проходящий мимо области Доминанты, направляется к выходам по цепочке каналов (верхняя схема рис. 7). На средней схеме рис. 7 импульс попадает в область Доминанты в силу геометрии связей, торможения в старой цепочке, в результате статистически возникшего ответвления потока. На нижней схеме рис. 7 выходной сигнал формируется Доминантой и может отличаться от первоначальной реакции сети.

Каким образом отдельные импульсы могут порождать достаточно крупные очаги возбуждения, сокращая при этом хаотичность реакций. Какова судьба таких очагов, их возникновение, распад, влияние на реакции сети как целого?

Будем рассматривать замкнутые контуры из каналов и нейронов, иерархически вложенные друг в друга или пересекающиеся друг с другом. Это можно объяснить как результат асимметрии ветвящихся входов и выходов. В самом деле, если нейрон может иметь до нескольких тысяч источников-входов (дендритный лес), то на расстоянии в 2 шага таких соседей будут уже миллионы, а на расстоянии 3 шага – миллиарды. Очевидно, такие цепи имеют массу пересечений.

### **Каскадное возбуждение и иерархия возбуждения**

Для начала рассмотрим простейшую линейную цепочку последовательно связанных нейронов. По мере поступления внешнего импульса в первый элемент цепочки он сразу или постепенно переходит сперва в предпороговое состояние, а потом и активируется. Это возбуждение по цепочке передаётся следующему элементу до тех пор, пока первый элемент не деактивируется. Дальнейшее поступление внешних для цепочки импульсов переведёт все элементы цепи в предпороговое состояние. Теперь достаточно небольшого дополнительного импульса, поступившего на вход первого элемента, чтобы активировалась каскадным образом последовательно вся цепь.

На рис. 8 и 9 показан эффект иерархического распространения возбуждения по паре вложенных цепочек каналов.

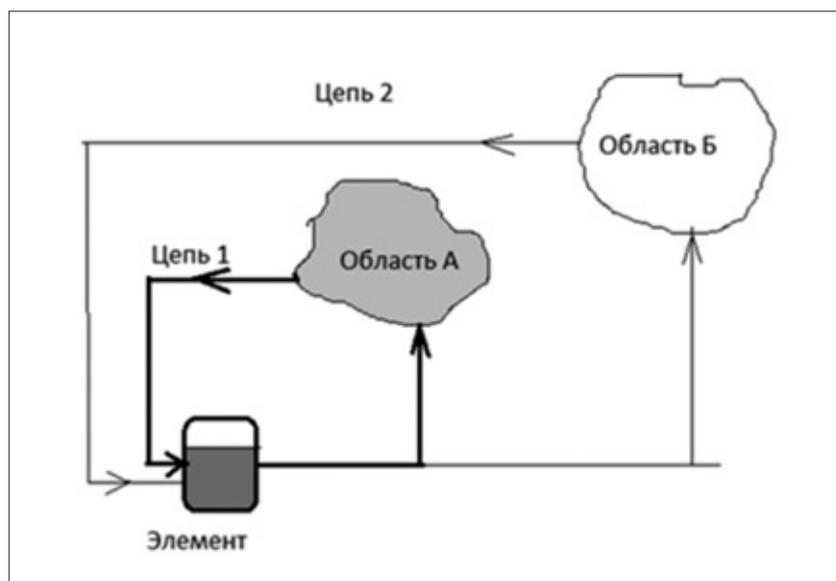


Рис. 8. Иерархия возбуждения

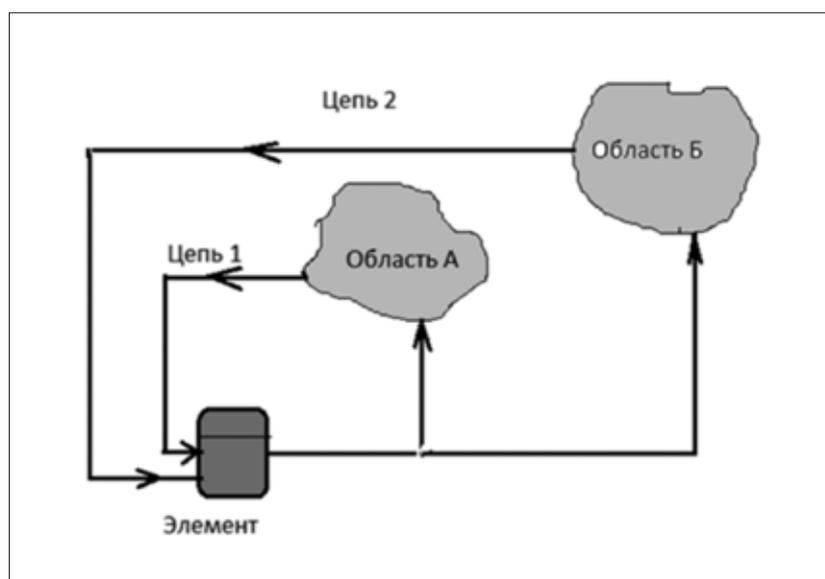


Рис. 9. Ветвление канала и иерархия возбуждения.

При недостатке пропускной способности внутренней цепи 1 активируется внешняя цепь 2.

### Алексей Ухтомский:

Доминанта «доводит до осуществления в виде механизма с определённой направленностью действия (с определённым вектором) то, пока мало определённое соотношение возбуждения в центрах, которое подготовлялось в непосредственно предшествовавшие моменты» ([12], стр. 103).

### Эффект Торможения

В сети наблюдаются как усиление сигналов, так и их торможение. Есть несколько вариантов объяснения механизмов торможения. Это химический принцип – выделение специальных веществ-ингибиторов реакций,

подавляющих процессы передачи импульса. В частности, при длительном возбуждении элемента (или контакта – синаптической передаче) повышается выделение ионов хлора, которые и редуцируют суммарный заряд, принятый нейроном. Это такой «фоновый процесс» – аналогичный «слаботочке». Есть и представления о специальном типе каналов с собственными электрохимическими свойствами, которые действуют как бы с противоположным знаком при суммировании воздействия на нейрон. Экспериментальные результаты в этом плане требуют специального рассмотрения.

В Части I мы напоминали один из основополагающих результатов И.Сеченова, утверждающий, что любое торможение в нервной системе первоначально зарождается как возбуждение [13]. Канал может оказаться тормозящим по крайней мере в двух ситуациях. Во-первых, при прямой связи между каналами (аксон-аксон, минуя нейрон) импульс в принимающем канале распространяется в обоих направлениях, в том числе и навстречу собственному потоку импульсов в принимающем канале. Во-вторых, вход может приводить к торможению в самом нейроне, создавая переполнение собственного уровня в теле нейрона и тем самым препятствуя передаче из других входов. При этом не требуется говорить ни о каналах «противоположного знака», ни о мгновенно выделяющихся ингибиторах.

### **Алексей Ухтомский:**

«Торможение возникает так, что возбуждающееся развивает своё влияние на тормозимое. Здесь также нужно думать о конфликте возбуждений... И нужно, по завету Шеррингтона, разобраться в каждом отдельном случае, где тот «общий путь», за одновременное обладание которым принуждены бороться возбуждения двух приборов... Естественно допустить, что чем более вышлифована путём упражнения координированная работа возбуждений и торможений в том или ином приборе, тем более экономно должно достигаться торможение» ([12], стр. 108).

### **Протуберанец – замкнутая цепочка каналов**

Возникновение тех или иных очагов возбуждения обусловлено законами сохранения суммарного заряда в сети, что при достаточном внешнем и внутреннем поступлении таковых и с учётом большого числа точек временной задержки импульсов становится весьма вероятным, а то и неизбежным. Как и в случае каскадного возбуждения, возможные выбросы импульсов по цепочкам каналов могут через какое-то число участков остановиться, либо замкнуться на один из элементов цепочки. Такие участки, возможно недолго живущие, будем называть протуберанцами.

## Зарождение Доминанты

Доминанта как стабильный очаг возбуждения может быть либо развитием набора протуберанцев под воздействием дополнительных внешних импульсов, либо следствием статистических свойств интервалов переходных процессов – их вероятностным перекрытием во времени. Вторым вариантом – пример самозарождения Доминанты в состоянии покоя системы от внешних воздействий. На рис. 10 изображён протуберанец, превращающийся в замкнутое расширение очага возбуждения.

Предположим, что цепочка из трёх соединённых последовательно нейронов с одинаковыми ёмкостями в 10 единиц имеют нагрузку в 10, 7 и 8 единиц заряда соответственно. При поступлении в элементы этой цепочки сигнала из трёх импульсов по 3 единицы произойдёт примерно следующее. Элементы цепочки поглотят 0, 3 и 2 заряда соответственно; при этом будут отторгнуты импульсы величиной 3, 0 и 1 единиц. Это и есть феномен Доминанты как аттрактора и рефлектора. Поскольку Доминанта состоит из нейронов и каналов, уровни зарядов в которых уравновешены (сбалансированы), то дополнительно поступившие в область доминанты импульсы будут нарушать эти равновесные условия и будут через некоторое время сброшены в виде сигналов по вполне определённым каналам. Это детерминизм Доминанты.

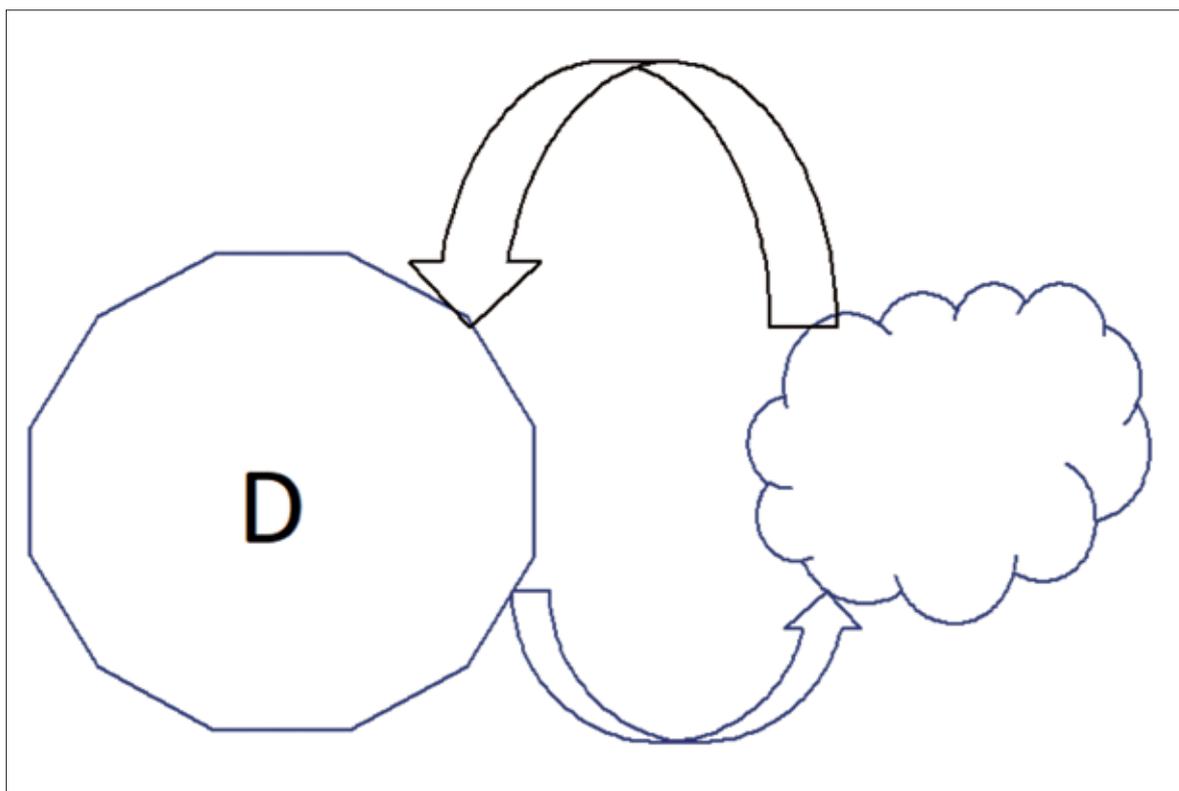


Рис. 10. Протуберанец и Доминанта.

Протуберанец в виде облака – выброс из Доминанты как очага возбуждения D.

При замыкании протуберанца в область Доминанты (D) происходит её расширение или миграция.

## Голографичность памяти и её ассоциативность

Объекты в природной памяти могут не иметь места хранения (в отличие от листа бумаги или винчестера). Они как бы дисперсированы (распределены) в виде волн зарядов, непрерывно движущихся по цепочкам из элементов – клеток. Это порождает голографичность памяти. При удалении даже значительной части сети её содержимое – как объекты, так и реакции может быть извлечено из оставшейся части сети, возможно с большой задержкой во времени. В каком-то смысле каждый значимый фрагмент сети по своей волновой картине уравновешен с волнами в других участках; это происходит, например, во время сна и занимает значительное время в отсутствие новых внешних импульсов. Известны случаи восстановления памяти по её половине. Известен и случай отсутствия коры у дамы, вполне адекватной до какого-то возраста. Важнейшую роль в этом явлении играет ткань, или косная часть памяти. На математическом сленге можно провести аналогию с избыточным хранением данных на дисках. Например, так называемые RAID-массивы. Математическая суть коротко такова. Если у нас есть пара величин и их сумма, то любая из этих трёх величин восстанавливается по оставшимся двум.

$$X+Y=Z$$

Если разрушен  $X$ , то его можно восстановить как разность

$$X=Z-Y$$

Если разрушен  $Y$ , то его можно восстановить как разность

$$Y=Z-X$$

$Z$  при необходимости восстанавливается как сумма  $X$  и  $Y$ .

Это широко распространённая практика избыточного резервирования в базах данных и операционных системах. При хранении всех трёх величин на разных дисках мы не боимся разрушения любого из них.

Роль величины  $Z$  играет, например, косная память, интегрирующая в себе волновые картины сети.

В нашем случае эффект можно выразить примерно так. Есть совокупность входных импульсов (или волн)

$X_1, \dots, X_N$  и косный фрагмент  $Z$ , являющийся их результатом.

При потере  $X_P, \dots, X_K$  они последовательно могут быть восстановлены по  $Z$  и оставшимся  $X$ .

## Ассоциация двух входов

Рассмотрим явление ассоциации на примере двух входных импульсов.

На рис. 11 элемент  $A$  соединяет цепочки от импульсов  $X$  и  $Y$  соответственно. Элемент  $B$  имеет две ветви – верхняя реализует реакцию на вход  $X$ , нижняя – реакция на пару  $X, Y$ .

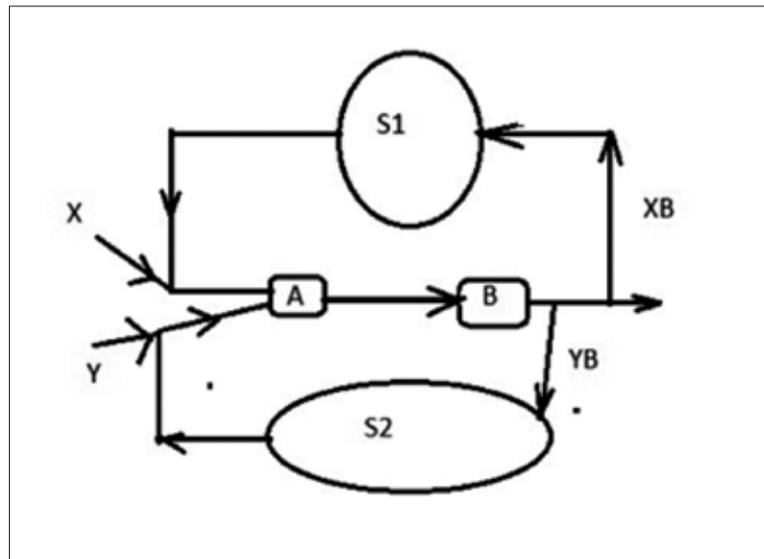


Рис. 11. Ассоциация двух входов.

Показан фрагмент сети, пара входных импульсов – X и Y, два сегмента сети S1 и S2, являющихся интеграторами – косными или доминантными и пара элементов A и B.

После поступления сигналов X и Y через какое-то время наступает равновесие – формируются состояния сегментов S1 и S2. Это означает, что прекращение поступления X и Y сохраняет состояния S1 и S2.

Теперь подаём X на вход сети с увеличенным импульсом. Это приведёт к появлению реакции YB на нижней ветке после B, а после прохода через S2 мы получим эквивалент Y.

Это простейший пример ассоциации.

### Увеличение детерминированности в условиях доминанты

Доминанта как непрерывная цепь активированных каналов, обладает повышенными скоростями проводимости и большей детерминированностью по сравнению с неактивированными цепями. Это стимулирует поглощение дополнительных поступлений из соседних участков, когда альтернативные пути будут бесследно поглощать новые импульсы. Таков эффект доминанты как аттрактора. Она же окажется рефлексом новых сигналов при достаточном предельном насыщении доминантной цепи. Самозарождение доминанты, как и её самораспад, могут объясняться законами больших чисел. Время от времени волны, проходящие по пересекающимся контурам, будут накладываться, что и станет зародышем формирования доминанты. С другой стороны, опять же в силу законов больших чисел, рано или поздно волны эти разойдутся по фазам, что и приведёт к самораспаду доминанты. Аналогичное явление было описано и как воронка Шеррингтона.

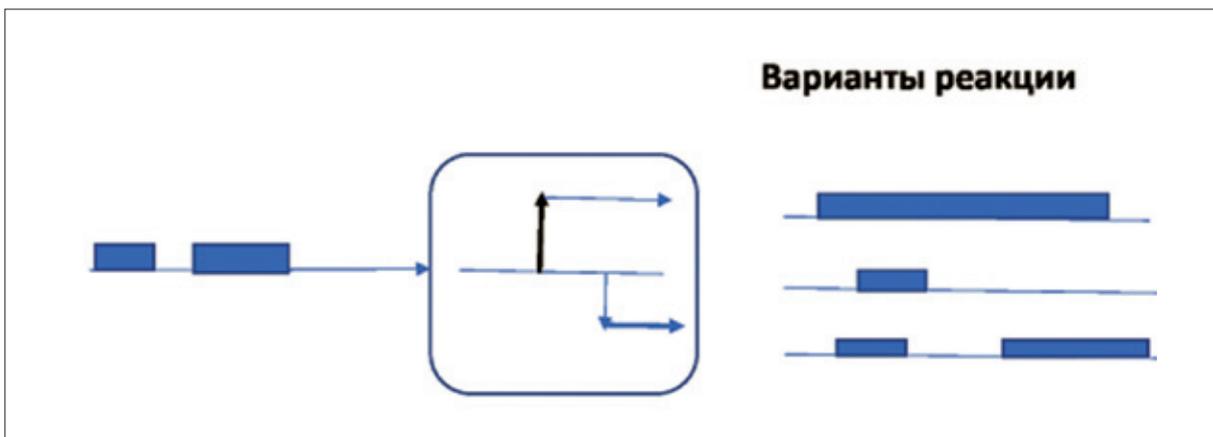


Рис. 12. Хаос. Недетерминированность реакций

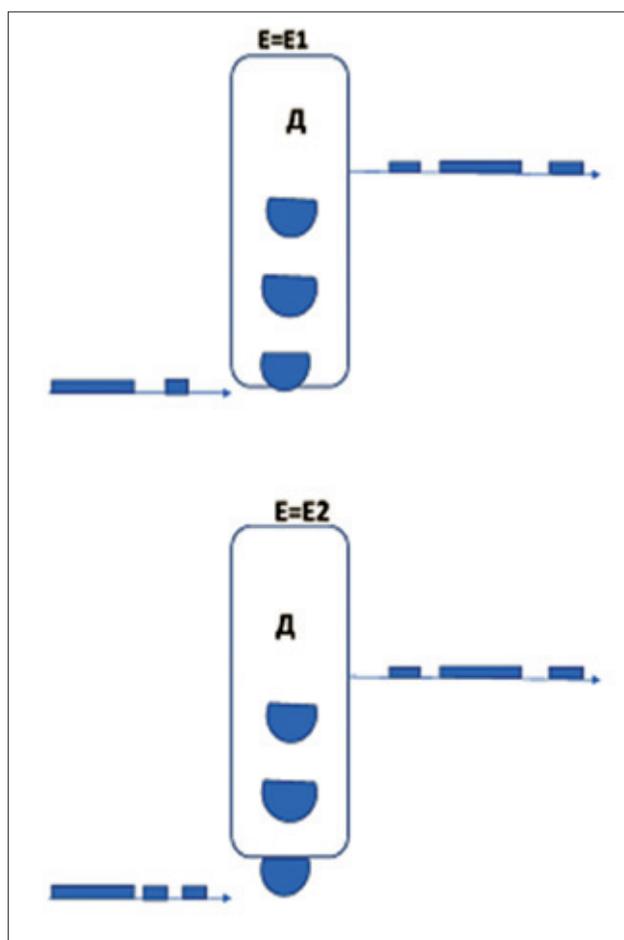


Рис. 13. Детерминизм Доминанты

На рисунках 12 и 13 – два разных входных сигнала одного класса, когда состояние сети отличается значениями набора случайных величин (фактические интервалы длительности переходных процессов и состояний объектов)  $E1$  и  $E2$ . В общем случае моторные реакции ( $M$ ) определяются процессами в сенсорной части ( $S$ ), состоянием интерсистемы ( $I$ ) и значениями случайных величин времён переходных процессов и интервальных значений результатов  $E$ :

$M = M(S, I, E)$

Если  $S=S1$  и  $E=E1$ , то реакция сети

$M=M1$

$M = M(S, I, E)$

Если  $S=S2$  и  $E=E2$ , то реакция сети

$M=M2$

Реакции  $M1$  и  $M2$  могут как угодно отличаться. Наличие Доминанты даёт  $M1 = M2$  (с точностью до шкалы Наблюдателя).

Зарождение Доминанты даже в отсутствие внешнего импульса может объясняться следующими особенностями наших моделей: асимметрия ветвей, свойства аттрактора, законы сохранения и разрушающее считывание.

Наиболее интересный вариант зарождения Доминанты – волевое усилие организма. Вспомним мысль Ивана Сеченова (см. Часть I) – упреждающая реакция организма, сосредоточенность, предвидение. Отсюда распространённое в зарубежной литературе именование эффекта Доминанты – «anticipation».

Доминанта как геометрическое явление выстраивает ряды причин и следствий, когда последовательным событиям во времени соответствуют множества точек и фрагментов. Эти множества очагов в известном смысле обратимы – иногда мы можем выстроить последовательность прошлых событий во времени только искусственно анализируя их причинно-временные отношения. Здесь опять стоит вспомнить время по Александру Кронику, о чём говорилось в Части I [14].

Импульсы, циркулирующие по замкнутому контуру, могут трактоваться как ABCABC...ABC, а могут и как CABCAВ...CAB. В зависимости от выбора начальной точки временной развёртки в качестве «настоящего» прошедшее и предстоящее состояния элементов цепи могут меняться местами. Данная ситуация проиллюстрирована на Рис. 14.

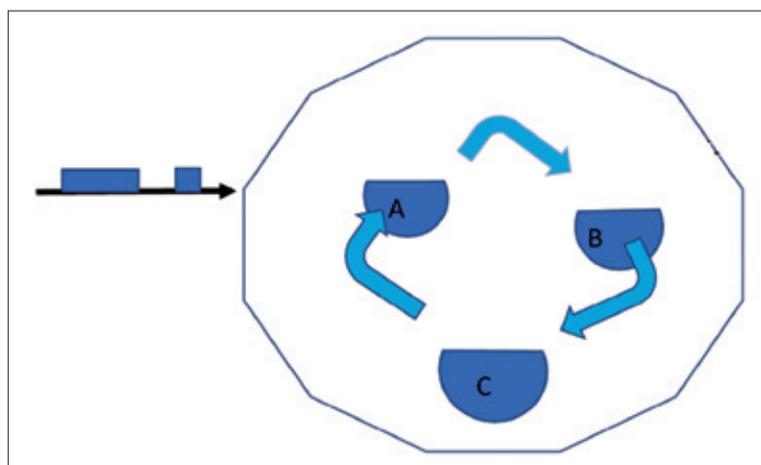


Рис. 14. Настоящее, прошедшее и предстоящее.

Самозарождение и самораспад Доминанты может происходить в силу статистических свойств переходных интервалов. Если имеется два или более параллельных каналов с перекрывающимися переходными интервалами, то порядок завершения соответствующих переходных процессов может в каждом конкретном случае оказаться произвольным, что приведёт к превышению порога срабатывания принимающего нейрона или к распаду цепочки активности.

### **Почему Доминанта может доминировать – аттрактор и реф-лектор**

Доминанта как очаг возбудимости – совокупность контуров, из элементов и каналов в активном состоянии. Если рядом с ней, то есть геометрически в соседнем участке, появится волна, направленная в сторону Доминанты, то у неё две возможности. Часть соседних импульсов может быть поглощена участком Доминанты, часть – отражена. В свою очередь, поглощённая часть импульса усилит Доминанту, при этом в случае достаточно большого значения нового поступления – где-то в контуре доминанты может произойти выброс излишка, который геометрия доминанты не способна пропустить. Таким образом, в соседних участках возникнет дополнительная волна. Получается, что доминанта поглощает импульсы одних соседних участков и распространяется в область других.

### **Состязание Доминант. Распад и угасание Доминанты**

При столкновении Доминант у более молодой больше шансов на победу. Это можно объяснить статистически – с течением времени максимальные отклонения случайных величин от нормы растут, поэтому у более старого очага вероятность самораспада выше.

Наличие двух устойчиво растущих автономных очагов возбуждения не может происходить долго. Возможно, этому есть статистическое обоснование. Это явление в гуманитарных областях называют диссонансом.

#### **Ещё подсказки от Алексея Ухтомского:**

«Если вам не нравится ваше поведение, то довольно бесплодная задача бороться с ним, атакуя его доминанты «в лоб». В результате будет, вернее всего, только усиление укрепившейся доминанты. Это потому, что за ней есть укрепившиеся физиологические основания, своя история и инерция. Целесообразней искать условия для возникновения новой доминанты – не пойдет ли она рядом с первой. Если пойдет, то первая сама собой будет тормозиться, и, может быть, сойдет на нет» .

«Когда Доминанта представляет из себя цепной рефлекс, направленный на определённый разрешающий акт, то, рассуждая теоретически, разрешающий акт и будет концом Доминанты» ([12], стр. 32).

Распад Доминанты может происходить как под влиянием другой или других очагов, так и по статистическим основаниям – рано или поздно совместное появление импульсов в нескольких контурах прекратится, после чего очаг может распасться на автономные участки.

«Возникновение новой Доминанты, функционально не совместимой с первой, намечает экзогенный конец для первой» ([12], стр.33).

«Мыслимо, далее, прямое торможение Доминанты с высших этажей нервной системы, например, с коры. Мы знаем, что и возбуждение, и торможение с коры особенно могущественно по своему действию на спинальные центры. Но, по всем данным, это торможение с коры, направленное на Доминанту «в лоб», достигается наиболее трудно. Это – задача «не думать про белого бычка», задача теоретического морализирования. Кора более успешно борется с доминантами, не атакуя их «в лоб», но создавая новые, компенсирующие доминанты в центрах, могущие свети их на нет» ([12], стр. 33).

Иерархия Доминант показана на Рис. 15. Объемлющая Доминанта может со временем распадаться на совокупность частей или формироваться из этих частей. Возможно также мигание Доминант, при котором в разные периоды таковыми оказывается либо она сама целиком, либо её вложенные фрагменты (и наоборот).

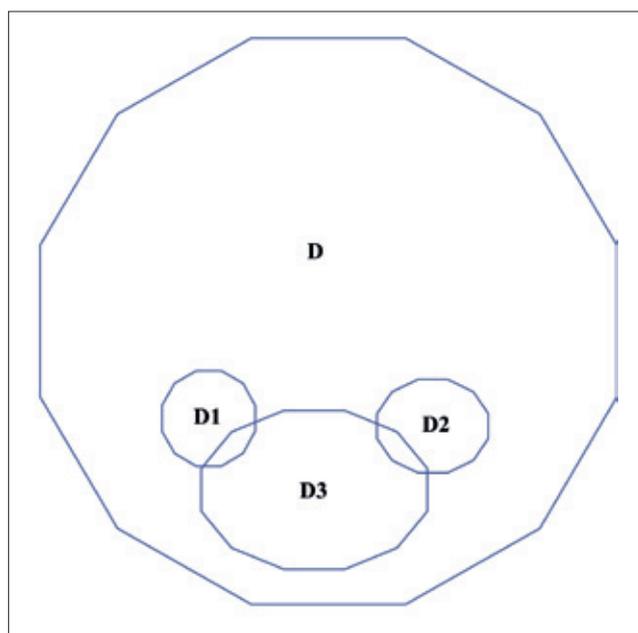


Рис. 15. Иерархия Доминант. Доминанты D1, D2, D3 (возможно пересекающиеся) являются частью объемлющей Доминанты D.

«Если для простых рефлекторных действий доминанта может разрешиться, исчерпать себя в действии, то для более сложных актов мышления и поведения – это не так. Как правило, у Доминанты вовсе не наступает конца.»

Состояние доминанты математически означает сбалансированность

входных и выходных импульсов в каждом нейроне; точнее говоря, разность между этими потоками не должна превышать запас ёмкости тела. Достижение такого равновесия по совокупности нейронов и каналов может требовать произвольно большого времени или формироваться из статистических свойств, а также под влиянием входных импульсов или внутренней воли индивидуума. Можно предположить в этой связи, зачем в сети так много параллельных цепочек каналов. Результат столкновения входного импульса с областью Доминанты зависит от текущих фазовых состояний встретившихся точек Доминанты. Параллельность входных импульсов обеспечивает разнообразие фазовых сдвигов импульсов входного потока, чтобы не весь сигнал стал отражённым.

В общем случае смена Доминант наиболее правдоподобно может происходить через разрушение старой Доминанты до состояния хаоса с последующим формированием новой Доминанты.

### **Динамика входов и выходов**

Области входов и выходов Доминанты динамичны. В зависимости от формируемых в ней сигналов эти области могут менять конфигурации (Рис. 16 и 17). Это также эффект антиципации (упреждения). Можно говорить и об областях подпитки и влияния произвольных очагов возбуждения в нейронной сети. Может оказаться, что эти области даже пересекутся, образуя своеобразный Рог (Рис. 18), где есть области, одновременно подпитывающие Доминанту, и являются и областями её влияния.

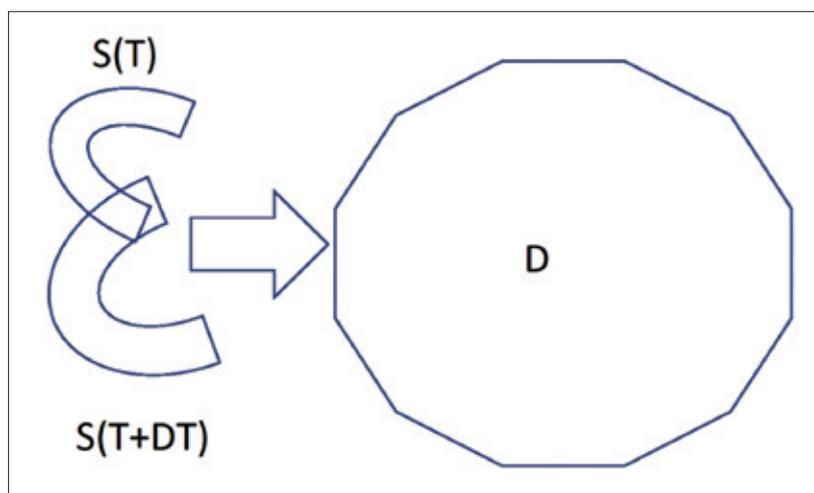


Рис. 16. Динамика входов Доминанты.

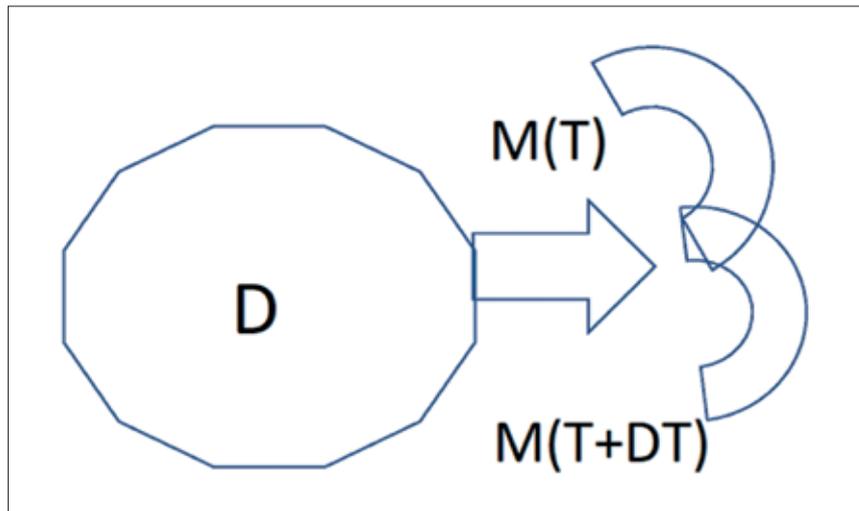


Рис. 17. Динамика выходов Доминанты.

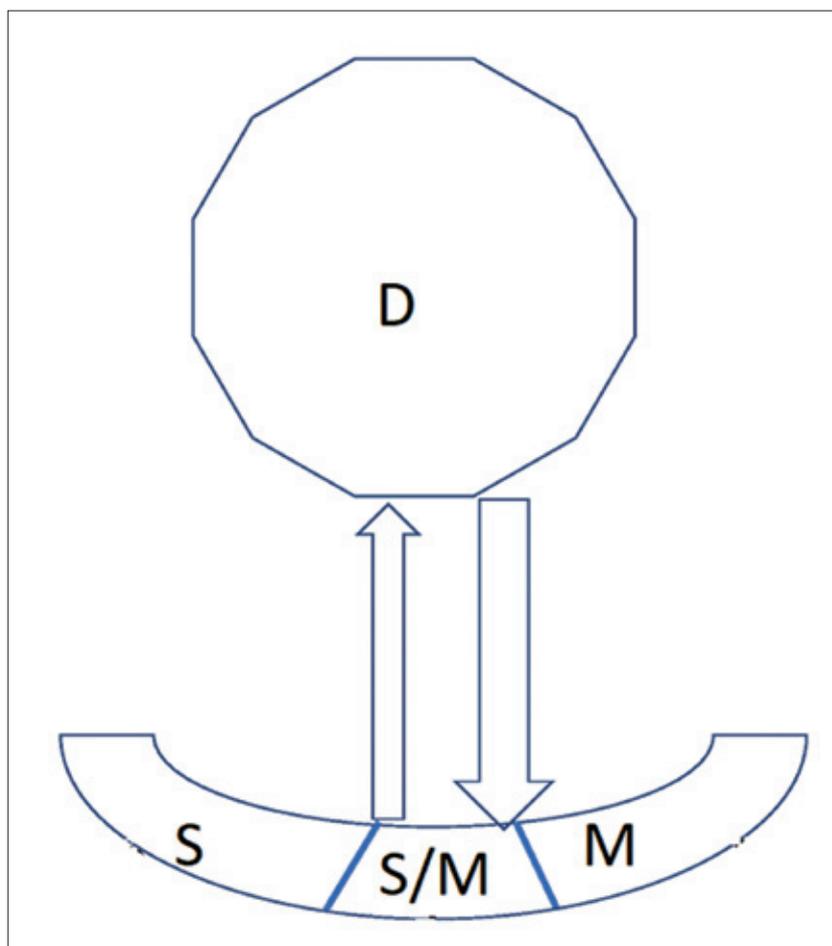


Рис. 18. Рог Доминанты. Входной и выходной участки сети могут пересечься.

#### 4. Инструменты компьютерной имитации

Напомним главные параметры нейронных сетей в природе. Сколько бывает нейронов? Вот небольшая сравнительная табличка из Википедии, где указаны источники этих цифр.

Организм	Примерное число нейронов
Гидра	5600
Медицинская пиявка	10 тыс.
Дрозофила, муравей	250 тыс.
Пчела, таракан	1 млн
Лягушка	16 млн
Мышь	70 млн
Крокодил	80 млн
Крыса	200 млн
Галка, сойка	1 млрд
Собачка	2 млрд
Медведь	10 млрд
Хомо сапиенс	86 млрд
Слон	250 млрд

При оценке масштабов предполагаемых численных экспериментов необходимо учитывать, что объектов моделирования на самом деле может быть значительно больше, с учётом комбинаторики ветвления всех каналов связи и объёмов буферных зон.

Средства компьютерной имитации или анимации асинхронных моделей – способ заменить натурные эксперименты. Дело не просто в нехватке материала или гуманитарных ограничениях. Цель – не только и не столько изучение природных механизмов нейронных сетей, а создание в перспективе альтернативных прикладных систем.

При выводе уравнения колебаний струны используется закон упругости. А этот закон мог быть обнаружен только в ходе массового эксперимента и при наличии шкалы Наблюдателя. Задачи такой среды – выработать конкретные варианты алгоритмов распространения импульсов как в оболочных каналах, так и на поверхности нейронных тел; алгоритмы распределения импульсов в точках ветвления; результаты встречи дискретных волн на поверхности нейронного тела; алгоритмы адаптации (реконфигурации) сетевой геометрии. Более сложные задачи – репликация структуры и содержимого сети при наследовании и распознавании родственных сетей. Восстановление структуры и содержимого сети по трассе.

Для построения рабочей экспериментальной среды потребуется решить ряд конкретных задач в математическом обеспечении. Сегодняшние системы управления базами данных не рассчитаны на хранение ветвящихся структур. Объектное программирование не считает связь самостоятельным объектом. Методология работы с интервальными числами

обособлена от языков работы с базами данных. Добавим требование интерактивности и статистической значимости, что требует специальных интерфейсов и очень высокого параллелизма.

Отметим ещё две принципиально новые проблемы при моделировании асинхронной нейронной сети. Прежде всего – независимость протекания времени в каждом из громадного числа объектов (нейронных тел, буферов, ветвей) при их корректном погружении в общее астрономическое время. Существующие в операционных системах механизмы разделения и квантования времени не дают гарантий такой корректности. Свойство эластичности и интервальности облегчит проблему блокировок и конфликтов при столкновении процессов в соседних объектах, но эти механизмы придётся пересмотреть.

И совсем уж новая проблема – «холодный запуск» или начальный старт асинхронной сети. Что делать при запуске серии асинхронных процессов – начальные состояния должны быть известны, но мы говорили о массовой неопределённости состояний объектов в любой момент астрономического времени. Подобные проблемы в своё времена порождали большие заботы при запуске процессов в операционных системах больших ЭВМ.

Для понимания сложности проблемы моделирования сети с большим числом элементов можно задаться простым вопросом – сколько событий может произойти в сети за одну секунду? Ответ прост – столько сколько элементов в сети! С учётом ветвей и переходных процессов – миллионы.

Понятие Доминанты может радикально сократить сложность вычислений и распараллеливание работы модели, если рассматривать очаг возбуждения как объект.

В системе компьютерной имитации можно будет подобрать варианты алгоритмов распространения дискретных поверхностных волн, их взаимодействия, прохождения волн через точки ветвления. Более сложная задача – репликация структуры и информационного содержимого сети без её тотальной остановки (гибели) с возможностью наследования основных реакций в схожих условиях входных потоков.

### **О зависимости волновых картин**

Обнаружить очаг возбуждения в нейронной сети алгоритмически несложно. Он состоит из группы соседних активных нейронов, связанных контурами аксонных цепочек. Но обнаружить зависимость между волновыми картинками гораздо сложнее.

Говоря, что Доминанта определяет реакции нейронной сети и моторной системы на сенсорные воздействия, мы должны понять, что означает само это явление в формально-математическом смысле. Мы привыкли

говорить о зависимости между числовыми величинами – возможно с некоторой кодировкой. Мы также используем это понятие для многомерных – векторных или матричных величин. Однако состояние нейронной сети – это непрерывный процесс в гораздо более сложных структурах. Простейший аналог таких процессов – дорожный трафик, хотя сегодня в нём анализируются именно числовые величины – уровень пробок и прогноз времени прохождения участков. Но даже в этом простом примере не всегда понятно, что играет роль функций и аргументов. Наша задача – описать зависимости между трафиками в разных районах города и в разных условиях, таких как дорожно-транспортные происшествия, перекрытие дорог, массовые мероприятия и прочее.

Есть ещё одно загадочное явление в нейронах – при росте нейрона сначала отрастает аксон, а уже потом – дендриты. Появление значения функции до появления аргументов способно вызвать настоящий шок у математика.

Пример автомобильного трафика даёт иллюстрацию ещё одной проблемы – выбор функций и аргументов. В нейронной сети также трудно однозначно признать величину значением функции или аргументом. Привычное понимание таково, что аксонный импульс является функцией импульсов на дендритных входах нейрона. Но если возникает явление торможения, когда выходной канал нейрона перегружен, то это вызовет торможение в самом нейроне и на его входах. Это дендритный потенциал действия, о котором стали задумываться совсем недавно. В планетарном представлении нейрона это совсем очевидно. Функция и аргумент могут поменяться ролями, а между входами-аргументами возникает взаимная зависимость. В ситуации с Доминантой это выглядит как её рефлекторная роль.

В Части I мы использовали простейший вариант кодирования совокупности сигналов в параллельных каналах. Напомним смысл этой кодировки. Строка вида (2,1,2,3,1,3) означает, что импульс по каналу 1 возник после зарождения импульса в канале 2 и до угасания импульса 2. Импульс 3 возник после угасания импульса 2 и до угасания импульса 1. Последним в этой волне угас импульс 3. Временные сдвиги импульсов, не нарушающие этого порядка, можно считать процессами одного класса.

Мы говорили также о Трассе участка нейронной сети. Это линейная запись событий в объектах, входящих в наблюдаемый участок, погруженных в единое событийное время, то есть с отражением взаимного порядка таких событий в разных объектах участка. Таким образом, трасса – это пучок линейных последовательностей, выстроенных хронологически для всего участка. Здесь возникает два уточнения.

*Гласные и согласные.* Так можно образно назвать проблему неопре-

делённых значений. В асинхронной сети мы должны учитывать переходные состояния объектов – от одного значения к другому, которые могут занимать заметное время. Поскольку мы договорились использовать интервальные правила арифметики, то можно использовать интервальные значения и для переходных состояний объектов трассы. Доминанта как раз и снимает зависимость результирующей реакции от этих переходных случайных состояний. Аналогия с гласными и согласными состоит в том, что в русском языке информативны прежде всего согласные, а гласные звуки просто связующие переходные гортанные реакции. Вспомним старое письмо с тильдами и надстрочными «закорючками» и вариативность не только произношения, но и написания общих слов в разных регионах и внутри группы наших языков. Особенно явно это видно на сравнении русской и белорусской орфографии. Интервальные переходные состояния объектов также содержательно малозначимы в условиях Доминант.

Более сложный случай неопределённости – взаимный порядок во времени событий в группе элементов. Если переходные процессы в паре объектов пересекаются в физическом времени, то их последовательность, вообще говоря, не определена. При проведении экспериментов придётся выработать приемлемую нотацию для таких ситуаций.

Также в Части I упоминался пример расшифровки кода генома [16]. Это оказалась в некотором смысле «псевдопериодическая» последовательность с повторяющимися группами из 32 кодовых значений, между которыми располагаются случайные – в каком-то смысле мусорные цепочки из 23 значений. Трасса участка нейронной сети выглядит подчас аналогично – с той разницей, что мусорные участки имеют переменную длину. Повторяющиеся фрагменты трассы могут соответствовать замкнутым контурам очага, а случайные – состояниям объектов из окружения контура.

Таким образом, для определения зависимости между волновыми картинками в нейронной сети нам необходим анализ трасс интересующих нас участков сети с точностью до шкалы наблюдения и с учётом неопределённых переходных состояний, а также неопределённости взаимного порядка событий во времени.

Говоря о Доминанте в режиме реакций на внешние воздействия, нам достаточно ограничиться входами и выходами сети, то есть её сенсорной и моторной частями.

Необходимо сделать ещё одно замечание. Нужно отличать корреляции между значениями случайных величин от функциональной зависимости между ними. В простейшем случае можно считать, что функциональная зависимость между трассами на участках сети имеет место, если эти участки в анализируемом состоянии имеют связывающие их активные цепочки.

## Логический и физический уровни модели

Можно сказать, что предлагается как бы «моделирование модели». Это означает, что мы хотим поэкспериментировать с самыми разными вариантами структур и алгоритмов с целью обнаружить такие варианты, которые визуально будут давать те или иные эффекты, присущие природной памяти – как они были перечислены в Части I.

Нейронная сеть в живой природе не зависает – значит, живёт не по Тьюрингу. Там нет семафорных примитивов Дейкстры, блокировок, тупиков. В то же время такие явления как эластичность, законы сохранения и разрушающее считывание с отсутствием синхронизации могут и облегчить решение такого рода проблем.

При желании понаблюдать работу модели при числе элементов и связей, сопоставимых с нервной системой млекопитающих (миллионы нейронов и миллиарды связей) нам не обойтись без создания специализированных электронных схем асинхронного типа, которые позволили бы большую часть нагрузки перенести с программного на аппаратный уровень. Такое решение обычно позволяет на порядки ускорить работу системы. Если говорить о перспективах прикладного применения модели, то без такого набора микроэлектронных устройств – то есть целиком на уровне программного обеспечения – её реализация окажется проблемной в принципе.

С точки зрения имеющегося программного обеспечения нам необходимы и специальные структуры представления данных – наши базы данных не рассчитаны на хранение связанных гроздевых структур. В реляционных и иерархических базах данных принципиально возможно хранение несбалансированных древовидных структур (например, в системах многомерного анализа больших данных), но это требует реализации их динамического синтеза – формирования на каждом шаге при обращении к каждой точке дерева. При этом отслеживание (синхронизация) связей между произвольными объектами становится предметом программного обеспечения прикладного уровня. Нам нужны специальные структуры, хранящие элементы с входными лесами и выходными деревьями, ветви которых синхронизированы друг с другом при их громадном числе.

Фактически речь идёт о разработке инструментальной среды для проверки разнообразных вариантов асинхронных моделей, доступной для широкого круга специалистов различных отраслей знания.

## 5. Методологические подходы Павлова и Ухтомского

В нашем сознании уже более века нейрофизиология и вообще физиология неразрывно связана с именем Ивана Павлова – это сформировано в дореволюционные времена, активно поддержано в 30-е годы на сессии ВАСХНИЛ («За чистоту учения И. Павлова»). Это перешло и к разработчи-

кам нейросетей. Основной отечественный проект в области нейроинформатики так и называется – «i.Pavlov», хотя неизвестно, как сам учёный отнёсся бы к такому написанию. Упоминание теории Доминанты в кулуарах даже очень продвинутых конференций и сегодня вызывает скепсис. Среди учеников Ивана Сеченова было и альтернативное направление – Алексей Ухтомский, ученик Н.Введенского. Его теория Доминанты незаслуженно забыта нашими инженерами. Об этом хорошо написано в недавно изданной монографии Семёна Резника [17]. За рубежом также осознана серьёзность теории Доминанты, о чём свидетельствует, в частности, недавно же изданная в США монография М.Надина [17]. В России также следует отметить ряд публикаций, содержащих весьма информативную подборку из работ Алексея Ухтомского и развитие его идей (см., например, [20]. [19]).

Для Ивана Павлова основой эксперимента был традиционный физический (механистический) подход – изучение того или иного явления в очищенном виде, то есть в отсутствии посторонних факторов. В те времена медицинское образование физиологи зачастую получали после физмата и существовало две школы – с наличием физико-математического и без него. Методика Ивана Павлова потребовала строительства и специального оборудования знаменитой Башни Молчания с жесточайшей дисциплиной поведения не столько подопытного животного, сколько наблюдателей – студентов. В результате чистой случайности – вынужденного переноса опытов из Башни в более-менее обычную обстановку аудитории результат оказался совершенно отличным, но столь же стабильным! По-научному это называется дефекацией. При повторении этой ситуации, у Алексея Ухтомского возникла идея о закономерности, что и привело к другой методике проведения эксперимента – поведении нервной сети в условиях обилия внешних факторов, соответствующих реальности! К этому следует добавить первичность динамики протекающих процессов и вторичность статики. В этом состояло методологическое отличие от традиционной механики, где изучение осуществлялось в обратном порядке. Здесь, возможно, и скрывается отправная точка расхождения двух доктрин.

### **Реконфигурация сети, репликация содержимого**

Мы уже отмечали, что реконфигурация сети может происходить динамически, то есть вследствие временных сдвигов импульсов, возбуждений и торможений. Это может быть результатом поступления дополнительного импульса в цепочку каналов, что вызовет либо каскадное срабатывание элементов цепочки, либо торможение в цепочке.

Теперь перечислим варианты физической реконфигурации, которые могут происходить при реализации серии статистических испытаний в условиях изоляции сети от внешних воздействий – отдых, сон.

Могут возникать новые нейроны, отмирать старые неиспользуемые заглушенные связи, появляться новые ветви и фрагменты. Могут изменяться сечения каналов и размеры буферов в зависимости от статистики, собранной в период активности. Из природных явлений это астроциты – механизм, подпитывающий нервную сеть и канализирующий ненужные продукты её деятельности. Могут возникать дополнительные разветвления на конце аксона перед его креплением к принимающему элементу, ускоряя тем самым приём импульса. Интересное явление – замедление времени прохождения импульса по участку канала путём увеличения его длины. Вспомним в этой связи олигодендроцитные перемычки, связывающие ветви разных каналов в пучки. Такое увеличение длины участка канала может достигаться его искривлением, то есть появлением и ростом извилин в пределах, допустимых перемычками. Ускорение прохождения импульса регулируется просто увеличением его сечения.

Проблема, которая нуждается в самостоятельном рассмотрении за пределами нашего текста, это репликация информационного содержимого нейронной сети. В Части I упоминалось явление эпигенетики, которое экспериментально недостаточно изучено. В чём заключаются принципиальные трудности копирования содержимого асинхронной сети? Это, прежде всего, переходные состояния, когда значения характеристик (например, заряда) в элементе не определено. При этом элементов, находящихся в переходном состоянии может быть очень много. Копирование содержимого асинхронной сети возможно только в результате процесса репликации материальных физических геометрических структур и наследования временных сдвигов импульсов.

Механизмы репликации ДНК достаточно хорошо изучены и математически не представляют проблемы – как бы ни была закручена спираль, хоть в тороидальные конструкции, её можно последовательно считать и воспроизвести одномерным проходом. А как зафиксировать и передать геометрию сети, состоящей из лесов? С этой проблемой придётся разбираться на этапе компьютерного моделирования.

### **Почему нейрон такой корявый, зона Брока**

Длительные периоды движения информационных волн по поверхности нейрона могут оставлять те или иные следы в его форме.

При запоминании слов работает кратковременная вербальная память, состоящая из нескольких компонентов. Когда человек пытается на несколько секунд удержать в памяти последовательность из нескольких букв, активируются, по меньшей мере, два процесса. Сначала подлежащие запоминанию объекты несколько раз прокручиваются по сетям зоны Брока, а затем повторно откладываются в буферное хранилище, где удерживаются.

живаются в течение нескольких секунд, а затем исчезают ([21], стр.17). Там же обсуждаются процессы порождения речи, чтения шрифта Брайля, восприятия звука, рассматривания образов, рассматривания лиц.

В работе [22] описан случай наблюдения за черепом самого Брока, хранящимся согласно воле учёного как экспонат в одном из музеев. Автор утверждает, что он отчётливо различал следы зоны Брока на его собственном черепе.

Почему нейрон такой корявый, то есть имеет столь замысловатую индивидуальную форму, особенно в части дендритных отростков? Возможно, это – как в боулинге Кардинала статистические следы индивидуально пережитых процессов, по-своему локальных Доминант нейрона. Мы уже упоминали о тканевой составляющей памяти.

Мы упомянули о связи информационного содержимого памяти с её материальной тканевой структурой, прежде всего костно-мышечной системой. Есть и другая сторона явления. Информационное содержимое нейронной сети оказывается связанным не только с наружными, но и с внутренними материальными структурами. Речь идёт о цитоскелете – материальной структуре, выполняющей роль своего рода каркаса при росте и, возможно, репликации физической конфигурации сети. Феномен зарождения и роста нейронов, как и наследование пространственных структур со «стартовым» информационным содержимым – область интенсивного научного поиска. Сперва, как ни покажется странным, у нейрона возникает аксон, а потом уже дендриты. Это соответствует планетарному представлению о нейроне и волновому характеру поверхностных импульсов, которые могут быть результатом, как внутренних токов, так и индукции от элементов окрестности. Загадочным остаётся процесс роста аксона – на его конце расположен так называемый конус роста, который понятнее было бы назвать метёлкой, поскольку он выглядит как веер, обращенный наружу. Этот конус состоит из пучка отростков, каждый из которых самостоятельно как щуп выискивает нужную ему цель, например, мышечный фрагмент моторной подсистемы. Оказалось, что подобное явление наблюдается и в интернейронах. Конус выискивает нужную ему цель, после чего успешная веточка фиксируется, а остальные отмирают. Самое удивительное заключается в том, что если какую-то из веточек силовым путём отклонить от заданного направления роста к цели, то после освобождения она неизменно восстанавливает нужное ей направление роста и поиска! Традиционно это объяснялось химическими особенностями молекулярного уровня в растущей и целевой частях. Однако рост конуса происходит и в отсутствие целевой мышечной ткани. Это означает наличие каких-то внутренних причин и механизмов роста аксона. Электрическая природа волн, исходящих из тела нейрона в аксон, вполне может быть таким механизмом. Если допустить,

что волны в растущем аксоне и цели согласованы противофазами, то их взаимное притяжение естественно. Однако в отсутствие цели происходит загадочная репликация начального состояния цитоскелета.

Рост аксона может гипотетически объясняться наличием специальной регулярной структуры типа решётки, по узлам которой и происходит рост аксона. Но остаётся проблема задания и использование таких координат и алгоритмов их обхода в сложных «лесовидных» структурах.

### **Коллар – асинхронная тканевая память стаи и экосистемы**

Коллар в общепринятом значении – это мужское кольцо из драгоценных камней, символизирующее власть. Это знакомо нам по классической европейской портретной живописи. Автором нового понимания этого слова, по-видимому, является композитор Владимир Дашкевич, работающий сегодня на стыке теории музыки и нейрофизиологии. Он предложил называть таким словом коллективный опыт или разум стаи индивидуумов [23]. Коллар формируется звуковым рядом между индивидуумами и стайей, включая также интонацию – в дополнение к линейной во времени последовательности звуков. В. Дашкевич считает интонацию выражением диссонанса между состоянием организма, очевидно, включая текущие и пережитые доминанты нейронной сети и окружающей средой.

Одиноким волк или птица может так подавать сигналы тревоги, опасности или комфорта, которые остальные члены стаи в состоянии воспринять, усвоить и использовать. Это очевидный пример взаимодействия нейронной сети и ткани в рамках биологического вида.

Отложенной и длительной реакцией на звуковые сигналы определённой интонации может быть реконфигурация нейронной сети. Тканевые структуры организма могут изменяться под действием импульсов нейронной сети, поскольку группа мышц связана с пучком нервных волокон и действует согласно временным сдвигам импульсов в подходящих к ней нервных волокнах. Группа мышц может подрастать (или атрофироваться) в точках, связанных с очагами активности. Состояние группы мышц отражает временную развёртку соответствующей области нейронной сети. Вспомним в этой связи утверждение А. Ухтомского – «Доминанта – это орган». (См. также [12]).

Алексей Ухтомский уделял большое внимание звуковым воздействиям на организм. Это можно объяснить более линейной природой звука и более изученными механизмами его усвоения – по сравнению со зрением. Это отражено, помимо общеизвестных работ по теории Доминанты, также в его малоизвестной статье о церковном пении [24]. (См. также [25]).

Это согласуется с фактом порой очень быстро происходящей эволюции, которая возникает одновременно и одинаково в большой группе ин-

дивидуумов. Такая одновременная направленность в большом числе точек наследования кажется неправдоподобной в условиях независимых случайных величин, влияющих на процессы мутации.

Если продолжать эти рассуждения, мы приходим к необходимости рассмотрения не только видовых групп организмов с соответствующими им нейронными сетями, но и развитие этих сетей в сочетании видов, что в биологии называют пищевыми цепями. Распространение на область социологии не входит в наши задачи в силу того, что в этих задач особенно высока цена ошибок.

### **Память виртуальная и материальная**

Можно сказать, что в предлагаемом классе моделей память имеет два уровня – виртуальный, или логический, и материальный, или физический. Виртуальный уровень памяти – это собственно временные соотношения протекающих переходных процессов. Физический уровень – структура элементов и связей, прежде всего геометрия каналов, а также буферов, геометрия дендритного леса входов и аксонного дерева, координаты размещения входов на поверхности тела каждого из нейронов. Мы оставляем пока в стороне такую важную материальную компоненту сети как цитоскелет – это материализованная основа или каркас построения элементов и каналов.

Адаптация памяти заключается в том, что её виртуальное содержимое периодически переносится в материальную составляющую – происходит физическая реконфигурация сети, меняются размеры буферов, сечения ветвей, появляются новые ветви. Типичный пример – периодическое отключение сети от внешних входов на период сна.

Говоря о Доминанте, мы вспомним мысль Алексея Ухтомского о том, что Доминанта – это орган. Он может первоначально быть виртуальным, динамично меняясь во времени, а может материализоваться в конкретный участок сети, выполняющий специфические функции и имеющий специфические структурные и молекулярные особенности.

Наличие материальной составляющей памяти нейронной сети не согласуется с концепцией виртуального мозга К.Э.Циолковского, по которой эволюция непременно ведёт к ликвидации тела как такового и зарождению мозга и сознания, распределённого на околоземной орбите.

### **Некоторые очаги и метки на трассе истории проблемы**

Отметим несколько имён и фактов из истории рассмотренной в тексте проблемы. Они кажутся автору важными, но со временем забываемыми, особенно для инженеров. Речь идёт о пересечении биологов вообще и нейрофизиологов в особенности с математиками вообще и компьютерным делом в особенности.

В 1959 году в СССР начал работу семинар под руководством И. М. Гельфанда и М.Л. Цетлина по математической биологии. На личной странице академика И. М. Гельфанда в Интернете есть подробная информация об этом семинаре, а также список его активных участников (51 человек), составленный учёным секретарём семинара М. Б. Беркинблитом. Работы М.Л. Цетлина относились и к проблеме формализации работы мышечной системы организма.

Сразу начал издаваться сборник Проблемы кибернетики (А.А.Ляпунов, О.Б.Лупанов). Энергичными усилиями Феликса Владимировича Широкова был переведён и издан сборник «Автоматы» (К.Э.Шеннон, Дж. Маккарти). Направление группы Введенского-Ухтомского начало воскрешаться после кропотливой работы В. Л. Меркулова над их научным наследием и личным архивом А.Ухтомского ([26]). Папка с материалами об Ухтомском загадочным образом попала к Семёну Ефимовичу Резнику уже после его эмиграции в США.

В 1970 году вышла работа С. С. Лаврова об эвристическом программировании [27] или о функциях искусственного разума. Отмечены два подхода к проблеме: «естественно-научный», состоящий в изучении природных организмов и систем управления в них, и «конструктивный», то есть создание компьютерных систем, имитирующих работу мозга. Наша статья находится в русле второго из указанных направлений. Применение эвристических программ разделено также на два вида: когда задача алгоритмически неразрешима (вспомним уточнение Дойча к тезису Чёрча – Часть I нашей статьи) или алгоритм имеет недопустимо большую сложность. В Интернете встречаются разные варианты списка авторов этой работы. Но в личном фонде академического архива А. П. Ершова сохранилась рукопись статьи, где значительная часть текста написана характерным почерком С. С. Лаврова и указан действительный авторский коллектив. Может оказаться важным один терминологический момент: автор зачеркнул слово моделирование и написал вместо него – «имитация». Это различие будет существенным в дальнейшей работе по компьютерной реализации моделей нейронных сетей.

В 1975 году вышло первое издание книги М.Б. Беркинблита «Электричество в живых организмах», где основные мембранные и физико-химические процессы молекулярного уровня нервной системы организма описаны понятным инженерам языком. Предполагается, что прохождение импульса через узел ветвления определяется молекулярными процессами. Отмечена иерархическая архитектура нейронных входов и ветвление аксона с его переменным сечением. Говорится о временных задержках сигналов в элементах сети, задаваемых случайными величинами. Обсуждаются некоторые варианты алгоритмов прохождения сигнала через

точки ветвления аксона. Форма тела нейрона может аппроксимироваться сферой. В этой связи интересны слова Пафнутия Чебышёва, сказанные студентам на лекции – предположение о том, что тело человека – это шар. В книге разобраны варианты дифференциальных уравнений в рамках модели Ходжкина-Хаксли, которая именуется как «Ха-Ха».

В те же годы группой учёных под руководством М.М. Бонгарда (ИППИ АН СССР) велась работа над построением компьютерной модели организма под названием «Животное» ([29]). В этом проекте появился важный для нас сегодня блок «Внимание», задающий выбор из альтернативных реакций организма, что непосредственно подводит к понятию Доминанты.

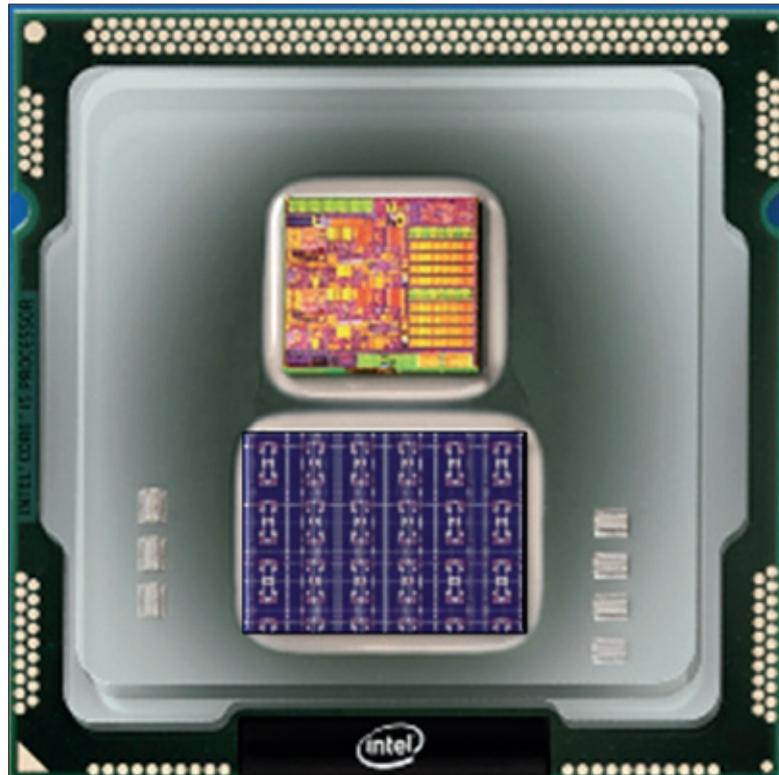
Наиболее активно тема Доминанты развивалась после А.Ухтомского его учеником – И.А. Аршавским сначала в Пущино (до ликвидации его лаборатории в 1980 году), затем – в Москве. Отношение научного сообщества к работам Аршавского неоднозначно и сегодня. Его «Энергетическое правило скелетных мышц» включает понятие негэнтропийности живой материи. Ещё тяжелее воспринимается коллегами положение Аршавского о том, что в живой материи на определённой фазе происходит «обратное течение времени». Тем не менее, работы Аршавского легли в основу его деятельности в области практической педиатрии. В частности, то касается неделимости реакции организма, запускаемой в условиях Доминанты. Эта область сегодня – наиболее значимое внедрение теории Доминанты.

О работах по теории Доминанты игумена Свято-Данилова монастыря Феофана (Крюкова) мы говорили в тексте.

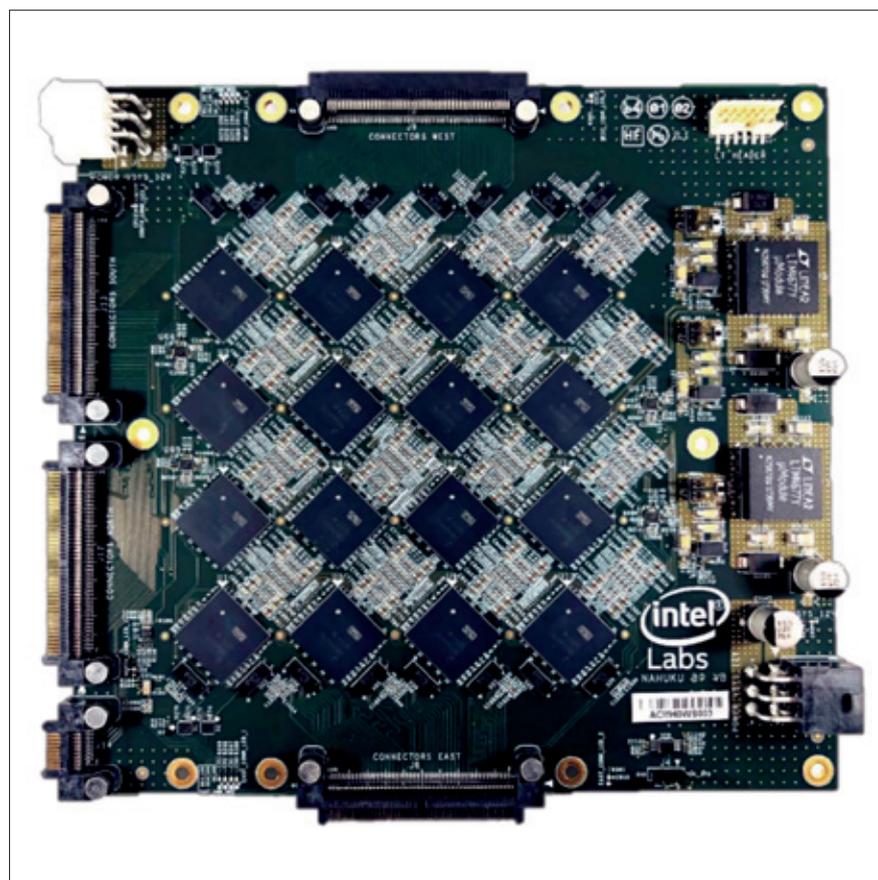
Изданный в США сборник [17] о работах по Доминанте в нашей стране можно считать симметричным событием к изданию сборника «Автоматы». К сожалению, многие из вошедших в сборник статей не имеют русского варианта текста.

### **Аппаратная реализация нейронных сетей сегодня**

Сегодня многие фирмы разработали и предлагают целый ряд электронных устройств нейроподобного типа. По большей части в них реализован коннектомный подход. В то же время в устройствах фирмы Интел (Loihi) предусмотрены случайные величины для задержки сигналов и – в нарушении правил коннектома – упорядоченность входов в элементы нейронной модели. Таковы возможности архитектуры аппаратной шины. Это можно отнести ко второму из направлений, упомянутых С.С. Лавровым.



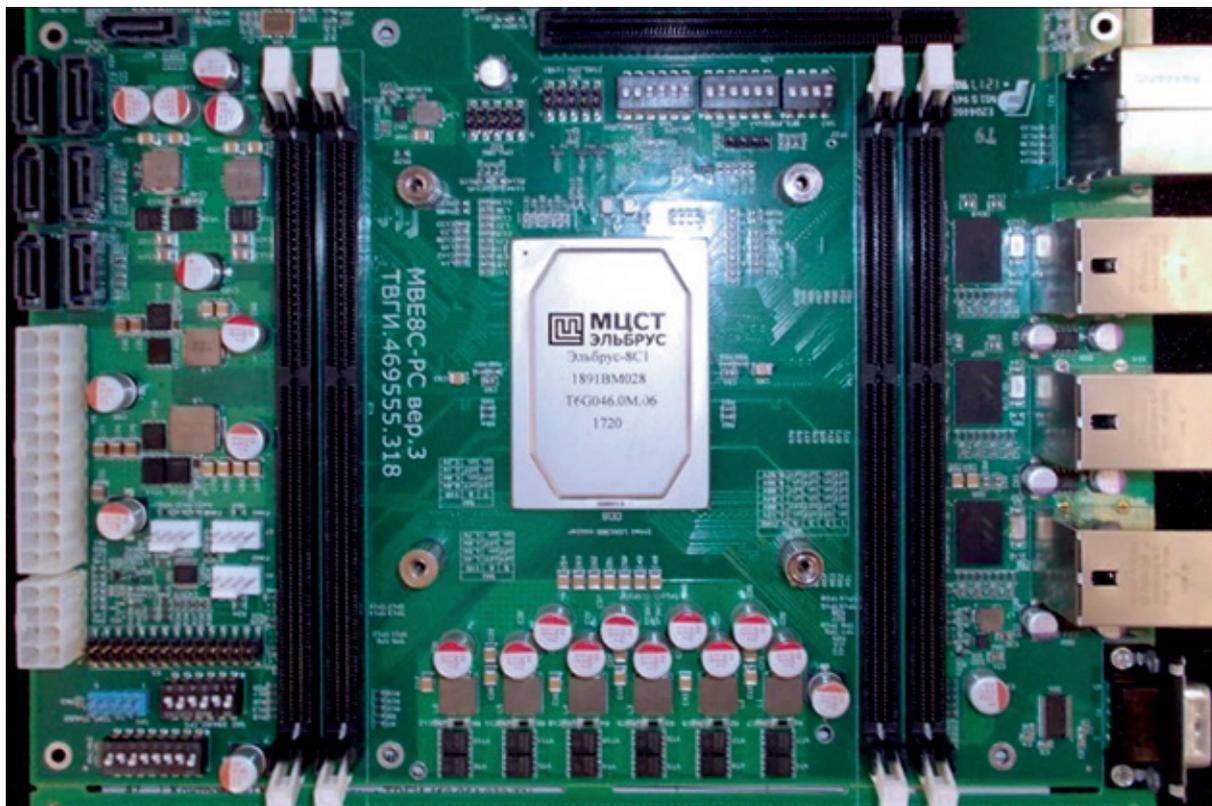
Интел. В общей сложности 130 000 нейронов и 130 миллионов синапсов.



Интел Nahuku (32 чипа, 4 м нейронов). 4096 нейроморфных ядер, включающих в себя в общей сложности 4194304 нейронов и 4160 000 000 синапсов.

## Нейронные сети Ашманова

У наших разработчиков есть несомненные достижения в аппаратной реализации поддержки нейронных сетей. К сожалению, история и перспективы процессоров серии Эльбрус вызывает большие опасения (<https://habr.com/ru/post/389573/>). Как могут выглядеть устройства без синхронизации – пока сказать трудно.



Отечественный вариант – Эльбрус. PuzzleLib – платформа для нейронных сетей.

Платформа содержит модули для сборки нейросетей ([https://habr.com/ru/company/ashmanov\\_net/blog/469033/](https://habr.com/ru/company/ashmanov_net/blog/469033/)):

(Activation (Sigmoid, Tanh, ReLU, ELU, LeakyReLU, SoftMaxPlus), AvgPool (1D, 2D, 3D), BatchNorm (1D, 2D, 3D, ND), Conv (1D, 2D, 3D, ND), CrossMapLRN, Deconv (1D, 2D, 3D, ND), Dropout (1D, 2D) и др.)

Оптимизаторы (AdaDelta, AdaGrad, Adam, Hooks, LBFGS, MomentumSGD, NesterovSGD, RMSProp и др.)

Готовые к использованию нейросети (Resnet, Inception, YOLO, U-Net и др.)

## Заключение к части II

Мы описали лишь в общих чертах возможности и перспективы асинхронного подхода к моделированию искусственных нейронных сетей. Конкретные примеры моделей с набором ключевых алгоритмов могут появиться

ся лишь в результате компьютерного моделирования таких вариантов. Мы лишь попытались подсмотреть некоторые механизмы в устройстве живой природной нервной сети и подслушать классиков нейрофизиологии. Как и в космологии, приходится во многом гадать о правдоподобии тех или иных решений. В отличие от космологических моделей, в случае с нейронными сетями можно предъявить к их моделям еще и такое требование как возможность их прикладного применения.

Предложенное нами описание ограничено прежде всего геометрическим классом связей – иерархически ветвящиеся древовидные структуры переменного сечения между физически отдалёнными элементами. Несмотря на некоторые аналоги явления Доминанты и её смены, которые могут наблюдаться в сетях другой природы, подобные обобщения могут не иметь достаточных оснований. Это касается прежде всего сферы социологии, в которой особенно велика цена ошибочных решений. Синонимы Доминанты и производные понятия используются в описании явлений общественной жизни, но при этом нарушаются некоторые из тезисов асинхронных нейронных сетей. Это изолированность каналов и их вторичность по отношению к элементам; неограниченность тиражирования информации при радиальном характере её распространения (СМИ) и т. д. Что касается более простых природных структур, где соседство элементов носит физический характер, например, в кристаллах, то некоторые аналоги возможны. Там также наблюдается интересное явление – смена порядка через состояние хаоса. Об этом свидетельствует так называемый эффект Ребиндера. Он приводит к изменению прочности твердых и пористых тел вследствие физико-химического влияния среды, в которой эти тела находятся. Причем важной особенностью этого эффекта является его обратимость. Имеется в виду наличие термодинамической устойчивости границы между твердой фазой и средой, а также исчезновение эффекта при удалении среды. Подобное созидание через разрушение наблюдается при росте кристаллов в гелях.

В то же время следует признать, что инструменты Коннектома сохраняют свою значимость при расширении сферы их использования от кристаллических до социальных структур (бинарность отношений, отсутствие требований законов сохранения). Однако проблема асинхронности остаётся значимой и требует своего решения и в этих областях.

Приведём также мнение Семёна Резника о личности Алексея Ухтомского: «...Хотя личность Алексея Алексеевича меня занимала с очень давних времен, а написание книги потребовало углубленного изучения материалов, я не претендую на то, что до конца проник в его совершенно уникальный духовный мир. Его жизнь, деятельность, круг общения, система ценностей не укладываются ни в какие стереотипы. Прямой потомок Рюрика был очень непривередлив. Заграничным отелям и изысканным деликатесам предпочитал пешие походы по

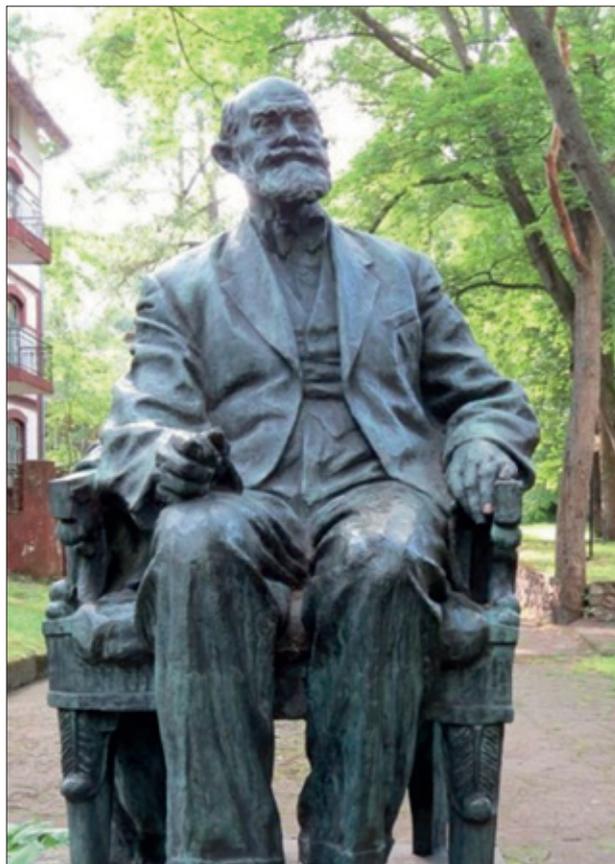
полям и весям, лесные грибы и ягоды, ночевки в палатках или на сеновале, общение с крестьянами, странниками, монахами и монахинями и т. п. Он прекрасно знал основные европейские и древние языки, что позволяло следить за движением мировой науки. Был знатоком литературы, мировой философии, классической музыки. Православный христианин, он не признавал официальной церкви, был старовером. Он создал свое морально-этическое учение, основанное на синтезе физиологии нервной системы и религиозного мировоззрения...»

Серия статей С.Резника [33] содержит много информации, дополняющей книгу об Алексее Ухтомском и много фотографий.



Ухтомский в Рыбинске в период работы над магистерской диссертацией. 1910.

Из статьи С.Резника. Журнал 7 Искусств. Номер 5(52) май 2014.



Памятник И.Павлову в Светлогорске. Об истории необычного памятника:  
<https://strana39.ru/news/istoriya/86909/fiziolog-ivan-pavlov-protiv-mikrobiologa-roberta-kokha-.html/>



Памятник во дворе Института Экспериментальной медицины. Санкт-Петербург.



Башня молчания и операционная Павлова (под стрелкой).  
(<https://presentacii.ru/presentation/i-p-pavlov--osnovatel-otdela-fiziologii>)

Это – естественно-научное направление исследований в терминологии С.С.Лаврова. Башня обеспечивала устранение по возможности всех посторонних факторов. Можно считать эту башню точкой развилки подходов Ивана Павлова и Алексея Ухтомского.

### **Благодарности**

Ряд позиций из предложенного текста докладывался на конференции по нейроинформатике в Красноярске, а также на двух заседаниях межфакультетского семинара по проблемам времени в МГУ, которым бесценно руководил Александр Петрович Левич, памяти которого автор и хотел бы посвятить настоящий текст. Автор признателен участникам семинара за живое обсуждение доклада «Об информационной Хронотопе».

Ф.В.Широков в 1980 году обратил внимание участников семинара объединения «Интерфейс» АН СССР под рук. – В.Н.Терских на работы в Пушчино по реализации компьютерных методов на фазовых сдвигах локальных процессов во времени. Тогда же Р.П.Дименштейн познакомил участников семинара с работами Ухтомского и Аршавского.

Некоторые сведения о природных нейронных сетях почерпнуты, помимо общепринятых учебников, также из более современной книги [30], а проблемы реализации систем с большим числом узлов – из работы [31].

Автор благодарен также Макару Александровичу Фадееву за рисунки к статье.

## Литература

1. Ухтомский А. А. Система рефлексов в восходящем ряду // Труды научной сессии, посвященной памяти академика И.П.Павлова 27-28 сентября 1942 г. Ленинградское газетно-журнальное издательство, Ленинград 1942 Под ред. Профессора В.И.Делова. Стр. 7-10.
2. Уоддингтон К.Х. Основные биологические принципы // Мир, 1970. С. 11-38.
3. Gorban A. N., Gorbunova K. O. Liquid brain: Kinetic Model of Structureless Parallelism // International Journal of Computing Anticipatory Systems. – 2000. – Vol. 6. – P. 117–126.
4. А.А.Псеунок. Анатомия мозга // Майкоп. 2003. 110 с.
5. Э.Шрёдингер. Что такое жизнь с точки зрения физики // РИМИС, 2009. 288 с.
6. Корыта И. Ионы, электроды, мембраны. Пер. с чешского // М., Мир, 1983, 264с.
7. Б.Баарс, Н.Гейндж. Мозг, познание, разум: введение в когнитивные нейронауки, Т. 1,2. // Лаборатория знаний» (Серия: «Лучший зарубежный учебник»), 2016. Т.1 541 с., Т.2. 464 с.
8. Дж.Николлс, А.Р.Мартин, Б.Дж. Валлас, П.А.Фуке. От нейрона к мозгу: пер. с англ. // М., УРСС: Книжный Дом «Либроком», 2017. 676 с.
9. Х.Хармут. Теория секвентного анализа. Основы и применения // М., Мир, 1980. 578 с.
10. И.И.Бехман. Вибрационная механика и вибрационная реология (теория и приложения) // М., Физматлит, 2018. 752 с.
11. Филиппов Александр. Многоликий солитон // М., Наука, гл.ред. физ.-мат. Лит. 1990, 286 с.
12. А.А.Ухтомский. О временно-пространственном комплексе, или хронотопе. В сб. «Доминанта» // СПб, Питер, 2002. 448 с.
13. И.Сеченов. Рефлексы головного мозга // М., АСТ, 2014. 352 с.
14. Головаха Е.И., Кроник А.А. Психологическое время личности // Киев, Наукова Думка, 1984. 130 с.
15. S.Chebanov. Ukhtomsky's Idea of Chronotope as Frame of Anticipation.
16. Франк-Каменецкий М. Самая главная молекула: от структуры ДНК к биомедицине XXI века // М., Альпина нон-фикшн, 2017. (Серия «Библиотека постнауки»). 336 с.
17. С. Резник. Против течения. Академик Ухтомский и его биограф. //СПб, Алетейя, 2015. 364 с.
18. M.Nadin (ed.). Anticipation: Learning from the Past, Cognitive Systems Monographs // 25 Springer 2015.
19. Зуева Е.Ю., Ефимов Г.Б. Принцип доминанты Ухтомского как подход к описанию живого // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша, 2010 №12. 32 с.
20. Игумен Феофан (Крюков). Модель внимания и памяти, основанная на принципе доминанты // «Нейроинформатика-2006», М.,МИФИ, 2006.
21. Питер Абрахамс. «Мозг человека. Как это работает» // Москва, АСТ, 2016. 176 с.
22. Саган К. Мозг Брока. О науке, космосе и человеке // М., Альпина нон-фикшн, 2018. 458 с.
23. Дашкевич В.С. Великое культурное одичание // Русский шахматный дом, 2018, 720 стр.
24. Ухтомский А.А. О церковном пении // Заслуженный собеседник: Этика, религия, наука. Рыбинск, 1997.
25. Г.Е.Шилов. Простая гамма. Устройство музыкальной шкалы. Серия «Популярные лекции по математике» // ГИФМЛ, М., 1963. 24 с.
26. В.Л.Меркулов. Алексей Алексеевич Ухтомский. Очерк жизни и научной деятельности (1875-1942) // Изд-во Акад. наук СССР. Ленингр. отд-ние. Ин-т эволюционной физиологии им. И. М. Сеченова. – Москва ; Ленинград ;, 1960. – 315 с.

27. Лавров С.С. Эвристическое программирование. Г.М. Адельсон-Вельский, В.Л. Арларов, М.М. Бонгард, С.С. Лавров // Опубликовано в «Труды 2-й всесоюзной конференции по программированию». Новосибирск: изд. ВЦ СО АН СССР, 1970. 31 с.
28. Беркинблит М.Б. Электричество в живых организмах. Библиотечка «Квант».
29. Бонгард М. М., Лосев И.С., Смирнов М.С. Проект модели организации поведения – Животное // Моделирование обучения и поведения. М.: Наука, 1975.
30. Frank Amthor. Neuroscience dummies // J.Wiley & Sons, 2016. 390 с.
31. Махиборода А.В., Ильичёв А.В., Подобин А.А. Проблемы реализации массового динамического параллелизма // Наноструктуры, Т.14, номер 1(25), 2016, с. 41-67.

**ASYNCHRONOUS APPROACH TO MODELING  
OF NEURAL NETWORKS  
PART II.  
FORMATION IN THE CHAOS – FROM NEURONS  
TO THE DOMINANT**

A.V. Denisenko

*bp.denisenko@mail.ru*

Received 25.11.2018

Rejection of the total synchronization, lack of memory for storing the program code, and the conservation laws give rise to new problems. A neural network is considered both at the level of a single neuron and in the form of its section as a source of excitation in accordance with the concept of Dominant. Some mathematical features of the description of asynchronous neural networks with continuous parallel transition processes in the bodies of neurons and communication channels are considered. The problem of developing a software environment for simulation of neural networks of the proposed class is formulated. Some facts from the history of the problem are given.

Key words – asynchronous neural network, Dominant of Ukhtomsky, network reconfiguration, interval numbers.

DOI: 10.31145/2224-8412-2018-19-2-05-62