

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ, НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
РОССИЙСКАЯ АССОЦИАЦИЯ НЕЙРОИНФОРМАТИКИ
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНЖЕНЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
(ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ–2002

НЕЙРОИНФОРМАТИКА–2002

**IV ВСЕРОССИЙСКАЯ
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
КОНФЕРЕНЦИЯ**

**ЛЕКЦИИ
ПО НЕЙРОИНФОРМАТИКЕ**

Часть 1

По материалам Школы-семинара
«Современные проблемы нейроинформатики»

Москва 2002

УДК 004.032.26 (06)

ББК 32.818я5

М82

НАУЧНАЯ СЕССИЯ МИФИ–2002. IV ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «НЕЙРОИНФОРМАТИКА–2002»: ЛЕКЦИИ ПО НЕЙРОИНФОРМАТИКЕ. Часть 1. – М.: МИФИ, 2002. – 164 с.

В книге публикуются тексты лекций, прочитанных на Школе-семинаре «Современные проблемы нейроинформатики», проходившей 23–25 января 2002 года в МИФИ в рамках IV Всероссийской конференции «Нейроинформатика–2002».

Материалы лекций связаны с рядом проблем, актуальных для современного этапа развития нейроинформатики, включая ее взаимодействие с другими научно-техническими областями.

Ответственный редактор

Ю. В. Тюменцев, кандидат технических наук

ISBN 5–7262–0400–X

© *Московский государственный инженерно-физический институт (технический университет), 2002*

Содержание

<i>Игумен Феофан (Крюков). Модель внимания и памяти, основанная на принципе доминанты</i>	66
Введение. Основные проблемы моделирования внимания	67
Принцип доминанты и основные проблемы внимания	70
Фазовые переходы в мозге и принцип доминанты	78
Доминантная архитектура обработки информации в мозге	88
«Нейролокатор» — Центральный Управитель	96
Заключительные замечания	104
Литература	108

ИГУМЕН ФЕОФАН (КРЮКОВ)

Свято-Данилов монастырь, Москва

E-mail: kryukov@mail.cnt.ru

**МОДЕЛЬ ВНИМАНИЯ И ПАМЯТИ,
ОСНОВАННАЯ НА ПРИНЦИПЕ ДОМИНАНТЫ**

Аннотация

Описаны шесть основных проблем внимания в терминах доминанты А. А. Ухтомского. Последняя, в свою очередь, модельно описывается как системное проявление фазовых переходов в мозге. Приводится обзор теоретических и экспериментальных оснований для существования в мозге метастабильных состояний со временем жизни порядка одной секунды и более. Это позволяет решить все основные проблемы внимания одновременно, в том числе проблемы интеграции и Центрального Управителя. В этом отношении приведены новые данные, подтверждающие ранее сделанные предсказания. Работа может быть полезной при разработке доминантного нейрокомпьютера, свободного от недостатков коннекционистских архитектур, а также для модельной интерпретации данных о функционировании мозга, полученных с помощью современной экспериментальной техники функционального картирования.

HEGUMEN THEOPHAN (KRYUKOV)

St. Daniel Monastery, Moscow

E-mail: kryukov@mail.cnt.ru

**AN ATTENTION AND MEMORY MODEL
BASED ON THE PRINCIPLE OF DOMINANTA**

Abstract

The six basic problems of attention are described in terms of the dominant focus by Ukhomsky. The latter in its turn is modeled as a system expression of the phase transition in the brain. The theoretical and experimental grounds for the existence of the metastable states in the brain with life time of about one second and more are given. This solves simultaneously all the above problems of interaction between attention and memory, binding and central executive problems are included. The previous predictions are in this respect confirmed. We hope that the work will be of use for development of neurocomputers of the new type free from the limitations of connectionist architectures and for model interpretation of the new data on brain functional imaging.

Светлой памяти
Ольги Сергеевны Виноградовой
посвящается

Введение. Основные проблемы моделирования внимания

Более столетия назад Джеймс, один из основателей когнитивной психологии, писал: «Всякий знает, что такое внимание. Это обладание умом в ясной и отчетливой форме одним из нескольких одновременно возможных объектов или последовательностей мыслей. Его сущность — фокусирование, концентрация сознания. Оно подразумевает отвлечение от некоторых предметов, чтобы более эффективно иметь дело с остальными».

Не будем искать более современного, более точного определения внимания. Приведем лишь перечень функций, которые обычно ему приписывают и кратко опишем ряд проблем внимания, с ними связанных. Под *вниманием* будем понимать психофизиологический процесс, тесно связанный с процессами памяти и выполняющий следующие функции:

- игнорирование некоторых объектов для того, чтобы более эффективно анализировать другие объекты;
- формирование кратковременной и долговременной памяти;
- реализация межмодальной интеграции;
- контроль общего возбуждения (будем именовать его далее аразузлом);
- торможение ненужной или несущественной текущей активности для получения более легкого или более эффективного отклика на новые или жизненно важные стимулы.

Главная проблема моделирования внимания состоит в следующем: если на вход модели поступает смесь сигналов от различных источников, она должна быть способной узнать, опознать любую компоненту смеси. Другие функции внимания, которые были перечислены выше, также

трудны для моделирования, но они сильно зависят от этой основной проблемы.

Проиллюстрируем важность проблемы на примере. Изучение человеческого зрения свидетельствует о том, что мозг по-разному обрабатывает зрительную информацию в зависимости от поставленной задачи. Эта обработка может быть параллельной (*предвнимание*) или последовательной (*фокусированное внимание*). В первом случае обработка быстрая, не зависящая от числа объектов в визуальном поле, и глобальные свойства изображения эквивалентны локальным свойствам. Во втором случае анализ идет сравнительно медленнее, но целое (опознанный сигнал) «больше», чем сумма его частей, потому что отброшен мало значимый фон и акцент поставлен на анализе «фигуры», наиболее важной части изображения. Предполагается, что именно оперативная и автоматическая комбинация этих двух типов анализа и объясняет весь секрет превосходства человека в распознавании образов над самыми мощными компьютерами. Этот пример также показывает, что внимание должно быть глобальным свойством системы мозга, неразрывно связанным с его функционированием как целого, а не с одной, скажем, визуальной системой.

Как же на самом деле внимание связано с восприятием, памятью и другими когнитивными функциями? Эта проблема всегда была центральной как для психологии, так и для нейронаук. Но прогресс был медленным из-за плохого понимания процессов центрального управления вниманием и представления памяти в мозге.

В последнее время роль внимания изучалась с помощью двух типов моделей. Первый тип модели, который можно назвать *коннекционистским*, основан на теоретических предположениях относительно нейронов и их связей и широко использует компьютерную имитацию для того, чтобы определить, как параллельная обработка свойств может быть в принципе соединена с последовательным вниманием, для того, чтобы увеличить общую эффективность обработки системы. Здесь известные физиологические данные относительно нейронов и их связей обычно значительно упрощаются для того, чтобы можно было применить простой математический аппарат или компьютерное моделирование. Этот тип модели не столько проясняет реальные функции внимания, сколько предлагает некоторые полезные вычислительные архитектуры для решения технических проблем идентификации сигнала. Хорошим примером тако-

го рода модели может служить модель, описанная в работе [64] (Strong & Whitehead, 1989). Однако в последнее время коннекционистские модели пытаются объяснить взаимодействие внимания и памяти [22] (Braver & Cohen, 2001), [31] (Dehaene et al., 1998). Другой тип модели – тип *психологический* или *психофизиологический*. Он предназначен для того, чтобы с наименьшим количеством теоретических допущений и концепций объяснить детальное влияние внимания на восприятие, поведение, кратковременную и долговременную память. В этих моделях архитектура моделей определяется фактическими данными, а не возможностью компьютерной имитации или применимостью конкретного математического аппарата для анализа модели. Наиболее внутренне согласованная модель этого типа дается в работах [26] (Cowan, 1988) и [27] (Cowan, 1995). В настоящей работе приводится обзор результатов моделирования третьего, промежуточного типа. В нем, подобно второму типу, ставится задача лучшего понимания психологических и нейрофизиологических данных по вниманию, но применяется, подобно первому типу модели, некоторое упрощение реальности, которое позволяет исследовать модель аналитическими методами или с помощью компьютерного имитирования. В частности, мы предлагаем модель для обсуждения следующих проблем внимания, сформулированных в слегка отличающейся форме нашими предшественниками [12] (Ухтомский, 1966), [19] (Baddeley & Della Sala, 1996), [26] (Cowan, 1988), [46] (Koch & Ullman, 1985), [61] (Sejnowsky, 1986), [67] (Treisman & Gelade, 1980).

- I. **Проблема селективности стимулов.** Каков механизм селективности стимулов: почему некоторые одновременно предъявленные стимулы привлекают внимание и таким образом получают доступ к высшей сенсорной обработке, в то время как другие не получают?
- II. **Проблема долговременной памяти.** Каков механизм взаимодействия внимания и долговременной памяти?
- III. **Проблема интеграции.** Поскольку параллельная обработка стимулов происходит путем выделения свойств этих стимулов на ранних стадиях обработки, то возникает вопрос, как и где происходит реконструкция интегрального образа.
- IV. **Проблема инерции.** Существует большой разрыв между длительностью эффектов внимания, таких, например, как привыкание, и

длительностью нейронных событий, скажем, таких, как средний межспайковый интервал. Этот разрыв составляет иногда несколько порядков. Каков физиологический механизм замедления времени при переходе от нейронов к поведению? Какова нейронная основа сохранения длительного внимания к некоторым стимулам даже и в тех случаях, когда стимул предъявляется на сравнительно короткое время?

V. **Проблема торможения и подавления помех.** Какого рода обработке подвергаются стимулы, которым не оказывается внимания: тормозятся ли они активно или просто не допускаются к дальнейшей обработке?

VI. **Проблема Центрального Управителя.** Существует ли отдельная от памяти нейронная модально-неспецифическая структура, координирующая функционирование всех звеньев процесса внимания и памяти, или же внимание есть следствие самоорганизации структур новой коры?

Принцип доминанты и основные проблемы внимания

Доминанта в физиологии, согласно Большой Советской Энциклопедии, есть «фокус возбуждения, который временно определяет характер реакции организма на внешнюю и внутреннюю стимуляцию». Сам А. А. Ухтомский в 1923 году писал: «Под именем доминанты моими сотрудниками понимается более или менее устойчивый очаг повышенной возбудимости центров, чем бы он ни был вызван, причем, вновь приходящие в центр возбуждения служат усилению (подтверждению) возбуждения в очаге, тогда как в прочей центральной нервной системе широко разлиты явления торможения» [12] (Ухтомский, 1966, с. 7). Десятью годами позже он писал: «Доминанта есть не теория и даже не гипотеза, но преподносимый из опыта принцип очень широкого применения, эмпирический закон, вроде закона тяготения, который может быть сам по себе и не интересен, но который достаточно назойлив, чтобы было возможно с ним не считаться. Я считаю ее за «принцип» работы центров не потому, что она кажется мне как-нибудь очень рациональной, но потому что она

представляется очень постоянной чертой деятельности центров. В действительности доминанта может становиться и совсем не рациональной чертой работы центров, а только очень устойчивой чертой их работы. Во всяком случае, доминанта — один из скрытых факторов нашей нервной деятельности, притом не невинный, как может показаться сначала» [12] (Ухтомский, 1966, с. 125).

Из множества классических данных, на которых основывается доминанта, мы здесь выделим лишь пять наиболее тесно связанных с соответствующими пятью проблемами, описанными во Введении.

1. В нейромышечном препарате существует оптимальная частота стимуляции, соответствующая максимальной *лабильности* (см. ниже) нервной ткани и максимальной интенсивности мышечного *тетануса* (слитного сокращения). При дальнейшем увеличении частоты стимуляции можно пройти через критическое значение, после которого мышечная активность начинает уменьшаться до тех пор, пока не будет достигнуто состояния пессимума или состояние абсолютной невозбудимости. Подобное явление оптимума и пессимума можно наблюдать и по отношению к интенсивности стимула [2] (Голиков, 1970).
2. Наряду с распространяющимся импульсным возбуждением типа «все или ничего» в нервной системе существуют градуальные *локальные стационарные возбуждения*. Они могут быть созданы как нормальной стимуляцией, так и местным охлаждением, местным электрическим током или некоторыми химическими веществами. Состояние таким образом измененных локусов может быть определено функциональным параметром *физиологической лабильности*. Он соответствует максимальной частоте стимуляции, выше которой в нервной ткани происходит трансформация ритма [2] (Голиков, 1970).
3. Кроме оптимальной частоты силы раздражения и интенсивности стимуляции существует *оптимальная лабильность* и *оптимальная поляризация*, при которых стационарное возбуждение наиболее легко трансформируется в локальную ритмическую активность, которая может распространяться за пределы начального локуса [2] (Голиков, 1970).

4. При оптимальном уровне лабильности и поляризации наблюдается феномен *усвоения ритма*, состоящий в том, что возникающая синхронно с ритмом приходящих раздражений ритмическая активность сохраняется в течение некоторого времени после прекращения подачи раздражения [2] (Голиков, 1970).
5. Переходы от локального стационарного возбуждения к возбуждению распространяющемуся наблюдаются во время выработки или угашения условных рефлексов. Передача возбуждения в коре из центра сигнала в центр эффектора сопровождается синхронностью биопотенциалов в этих центрах, причем распространение возбуждения тем легче, чем большая поверхность вовлечена в синхронную когерентную деятельность и чем выше коэффициент взаимной корреляции «замыкаемых» центров. Для некоторых животных, например кроликов, указанная синхронность и когерентность осуществляется на частоте тета-ритма. Угасательное торможение («размыкание» центров) сопровождается расхождением частот сочетаемых центров, падением синхронности и синфазности медленных биопотенциалов, снижением лабильности в этих центрах [5] (Ливанов, 1975).

Теперь, имея в виду приведенные выше данные, легче понять системный характер принципа доминанты (табл. 1 на с. 73).

С другой стороны доминанта характеризуется следующими пятью локальными свойствами:

1. **Повышенная возбудимость:** для того, чтобы группа стимулов могла войти в доминанту, порог возбудимости доминанты должен быть ниже, чем сила приходящего возбуждения.
2. **Стойкость возбуждения:** для того, чтобы возбуждение могло произвести заметный поведенческий эффект оно не должно чрезмерно быстро изменяться во времени.
3. **Способность суммировать возбуждение:** способность накапливать возбуждение не только от специфической, но и от неспецифической стимуляции.
4. **Инерция**, т. е. способность сохранять состояние возбуждения, если первоначальный стимул уже миновал.

5. **Сопряженное торможение**, т. е. способность исключать из доминанты те центры, чья активность функционально не совместима с активностью доминантной конstellляции.

Уже в одной из самых ранних публикаций о доминанте А. А. Ухтомский писал: «В высших этажах и в коре полушарий принцип доминанты является физиологической основой акта внимания и предметного мышления» [12] (Ухтомский, 1966, с. 11). Теперь, зная основные глобальные и локальные свойства доминанты, обсудим возможность решения проблем внимания, описанных во Введении.

I. **Проблема селективности** связана с повышенной возбудимостью доминанты лишь в отношении к определенным внешним стимулам, а также и с конкретным ритмическим колебательным механизмом отбора этих стимулов. Учитывая, что доминанта — это конstellляция нейронных групп и ансамблей с определенными свойствами, указанными в табл. 1, становится почти очевидным следующее простое, но немаловажное утверждение:

ТАБЛИЦА 1

Принцип доминанты А. А. Ухтомского

В каждый момент времени в нервной системе существует лишь одна активная доминирующая конstellляция (созвездие, очаг) возбужденных локальных нейронных групп или центров, характеризующаяся единым ритмом и единым действием (поведением). Одни и те же отдельные центры или группы нейронов могут входить в состав различных доминирующих конstellляций, причем вхождение в данную конstellляцию или выключение из нее определяется способностью этих групп или центров усваивать единый темп и ритм активности. Следы прежних доминант длительно сохраняются в высших отделах нервной системы и при полном или частичном восстановлении первоначальных условий могут вспыхнуть вновь полностью или частично.

«Хотя селективное внимание хорошо обоснованно поведенческими экспериментами, оставалось неясным, что в биологических терминах селективируется и как. Теперь нами¹ предложено, что селективное внимание включает выбор одного из целого ряда различных глобальных клеточных ансамблей» [53] (Miller, 1989). Чтобы оценить значение этого нам хорошо известного, но на Западе нового результата и тем самым оценить силу принципа доминанты приведем часто повторяющийся в различных вариантах один и тот же непростой вопрос, неразрешимый, по-видимому, без принципа доминанты.

«Доказано, что эффект внимания воздействует на нейроны в первичных зонах, так что сигналы управления вниманием в большинстве исследований идут сверху вниз, от высших этажей к нижним. Но как эти сигналы возвращаются на раннюю стадию обработки, чтобы селективировать некоторые синаптические входы из множества других входов — остается глубокой тайной». [23] (Britten, 1996).

«Известно, что внимание влияет на ранние стадии зрительного восприятия. Проблема в том, как префронтальные клетки из системы управления вниманием узнают, какие клетки зрительной системы надо активировать» [70] (Ungerleider, 1995).

Ответ в терминах доминанты в обоих случаях простой: сигналам высшего уровня не нужно специально отыскивать и селективировать клетки нижнего уровня первичного анализа, так как согласно принципу доминанты они вместе и одновременно войдут в одну и ту же доминантную констелляцию, если усвоят единый темп и ритм активности. Как это реализуется в модели, будет описано позже.

II. Проблема долговременной памяти — это в терминах доминанты проблема долгоживущих состояний возбуждения, т. е. проблема сохранения следов прошлых доминант. При таком отождествлении принцип доминанты, как мы увидим далее, открывает новые широкие возможности в изучении проблемы памяти и, в частности, проблемы связи долговременной и кратковременной памяти. Опять, без доминанты эту проблему, по-видимому, решить не удастся, потому что она многосложная, как свидетельствуют специалисты: «Необходимо дальнейшее исследование вопроса о связи восприятия, памяти и отклика. Некоторые модели памяти используют различные синхронности, чтобы удерживать в кратковремен-

¹Автор не знаком с доминантой. — И. Ф.

ной памяти сразу несколько представлений. Но долговременная память для объектов и событий должна использовать более долговременные следы» [68] (Treisman, 1996).

III. Проблема интеграции, или, как ее еще называют, binding-проблема с точки зрения доминанты тоже оказывается тесно связанной с проблемой памяти, а не только с синхронизацией элементарных свойств объекта, как это сейчас обычно понимается в большинстве случаев. Дело в том, что каждая переживаемая нами доминанта восстанавливается не только по сигнальным компонентам или признакам объекта, но и по всем кортикальным компонентам этой же, но ранее пережитой доминанты. При этом доминанта может быть пережита как мимолетное воспоминание с ничтожной инерцией. «И тогда она без изменения, как постоянный и однозначный интегральный образ, скрывается опять в складках памяти. Но она может быть восстановлена и пережита вновь с почти прежней полнотою, с оживлением работы во всей соматической констелляции. Тогда она вновь надолго занимает своей инерцией работу центров, подбирает вновь биологически интересные для нее раздражения из новой среды и обогащает мозг новыми данными. После такого же оживленного переживания доминанты соответствующий образ скрывается вновь переработанным и уходит в складки памяти более или менее переинтегрированным» [12] (Ухтомский, 1966, с. 36)

По этой причине мы утверждаем, что проблема интеграции не может быть решена отдельно от всех основных проблем внимания и памяти. К этому же, по существу, выводу приходит фон дер Мальсбург [51] (von der Malsburg, 1995), предлагая шесть критериев решения проблемы интеграции. Аналогичные выводы делают и другие исследователи этой проблемы. Вот два примера.

«Современные модели не предлагают возможных решений для координации памяти эпизодов, внимания и рабочей памяти. Это представляет пример того, что повсеместно считается центральной загадкой исследования сознания: проблема интеграции» [55] (Newman & Grace, 1999)

«Раскрытие процесса, управляющего мультимодальной интеграцией, продолжает представлять громадную проблему». [52] (Mesulam, 1998).

IV. Проблема инерции — это центральная проблема доминанты, проблема понимания механизмов «возбуждения больших интервалов», т. е. нейронной активности большой длительности, значительно превосхо-

дющей, скажем, постоянную времени мембранного потенциала нервной клетки: «В основе доминанты лежит своего рода принцип инерции: склонность отвечать на раздражения все в одну сторону, в сторону текущей “рефлекторной установки”. Маховое колесо. Апериодичность реакции ЦНС на среду» [12] (Ухтомский, 1966, с. 247).

Приведем некоторые новые данные, подтверждающие актуальность проблемы. Кортикальные нейроны обезьян, выполняющих задание на кратковременную память, сохраняют активность в течение нескольких секунд после устранения стимула [50] (Lu et al., 1992), [76] (Zipser et al., 1993), [71] (Uusitalo et al., 1996), [36] (Fuster, 2001).

Нейроны префронтальной коры человека и приматов развили необычную способность обрабатывать информацию «на линии» — способность, которая, как многие думают, лежит в основе понимания, внимания и мышления. Эти нейроны обладают способностью транзитивно удерживать информацию во внимании в течение до 20 секунд. Обычно этот факт объясняется некоторым явно встроенным медленным химическим процессом [37] (Goldman-Rakic, 1996). Однако такое объяснение не всегда пригодно, поскольку величина временной задержки часто оказывается зависящей от функциональной нагрузки теста и от внешних условий, как например, в следующем опыте.

Магнитоэнцефалограмма человека во время задания на кратковременное удержание информации в памяти имеет необычную динамику колебаний активности в диапазоне 4–12 Гц. Эта активность начинается одновременно с подачей стимула (так называемый *reset*), и может продолжаться до 600 мсек. Длительность этой активности увеличивается линейно с увеличением нагрузки на память человека, т. е. с увеличением от одного до пяти объектов во внимании [66] (Tesche & Karhu, 2000).

Объяснение этих данных в терминах доминанты на первый взгляд не представляет затруднений. Проблема инерции внутренним образом связана с ключевой концепцией доминанты — физиологической лабильностью. Существенный пункт учения о доминанте состоит в том, что лабильность может изменяться и изменяется по ходу реакции, т. е. под действием стимулов и нагрузки. Соответственно меняется длительность реакции. Лабильность можно рассматривать как меру инерции активного состояния. Большая инерция означает малую способность прекращать развившееся возбуждение. Однако в «микроскопической» теории доми-

нанты возникает та же проблема: откуда возьмется большая инерция, если нейронная сеть, по предположению, это агрегат малоинерционных элементов. Эта проблема подробнее обсуждается в следующем разделе (с. 78–87).

V. Проблема Центрального Управителя — одна из наиболее острых, нерешенных, проблем не только психологии, но и самой доминанты. С одной стороны: «Нервная координация или соподчинение физиологических приборов в порядке их нервной увязки, есть процесс вынужденный и не предполагает для себя вмешательства какого-либо дополнительного «координирующего» центра. Координация в смысле соподчинения нервных актов получается по необходимости из невозможности осуществить одновременно требующиеся механизмы в одном и том же, относительно узко очерченном исполнительном аппарате» [12] (Ухтомский, 1966, с. 197). С другой стороны: «Почему центр господствует? Наиболее сильный. Наиболее биологически важный. Плеоназмы (многословие) вместо ответов. Ответа на «почему» все-таки нет!» [12] (Ухтомский, 1966, с. 250). Мы покажем далее, что ответ на «почему» все-таки есть, и что «координирующий» центр, он же Центральный Управитель, возникает, точнее, начинает функционировать как новое системное свойство вблизи точки фазового перехода.

VI. Проблема торможения и подавления помех прямо соотносится с важнейшим свойством доминанты — «сопряженным» торможением. Эту связь можно уяснить на следующем примере. Schillen и Konig (см. [60], 1994), моделируя интеграцию признаков в единый объект с помощью синхронизации осцилляторов, ввели десинхронизирующие связи между некоторыми осцилляторами с целью разрушить ошибочные интеграции разных, лишь временно перекрывающихся в пространстве объектов. Возникает вопрос: можно ли эту идею обобщить на случай, когда общими у разных объектов, кроме местоположения, будут еще какие-то другие признаки. Кажется очевидным, что при этом десинхронизирующее торможение должно быть динамическим, функциональным, а не преформированным, чтобы учесть различные варианты одинаковых признаков. Другими словами с каждой доминантой желательно связать только ей одной присущее торможение других мешающих ей доминант. Это и будет «сопряженное» торможение. Оно в принципе возможно, когда «возбуждение и торможение оказываются не противоположными процессами, но

родовым образом одним и тем же процессом с противоположным конечным эффектом, в зависимости от условий его осуществления. Основное и определяющее условие для эффекта дается степенью лабильности действующего эффектора в данный момент времени» [12] (Ухтомский, 1966, с. 601). Как такое возможно? Можно ли это понять с помощью простой физической аналогии?

Фазовые переходы в мозге и принцип доминанты

Идея возникновения торможения из возбуждения, наподобие физических фазовых переходов в противоположность торможению за счет структурно-фиксированной тормозной субстанции, пронизывает все аспекты учения Введенского–Ухтомского. Это учение до сих пор сталкивается с трудностями и непониманием вследствие того, что довольно сложно, малопонятно и нередко парадоксально лежащее в его основе физическое явление *фазовых переходов*. А. А. Ухтомский полагал, что дальнейшее развитие физики магнетизма и математической теории нелинейных колебаний прояснит многие из этих парадоксов. В этом направлении он предложил в 1940 году совместно с П. Гуляевым первую модель нелинейных колебаний, объясняющую *усвоение ритма, оптимум и пессимум частоты и силы стимуляции, эффекты принудительной синхронизации, инерционного отставания, деления частоты* и другие эффекты связанных нелинейных осцилляторов, частично упомянутые в начале предыдущего раздела (с. 71–72). В этой же работе он ставит важный вопрос: «Нельзя ли приписать общие черты поведения физиологических систем переменной лабильности и нелинейных колебательных систем тому, что и там и здесь дело идет, во-первых, об инерционных системах и, во-вторых, о различных выражениях преодоления инерции» [13] (Ухтомский, 1978, с. 194), и сам же отвечает на этот вопрос в другой работе: «Уж если роль следов во времени заставляет учитывать себя в *магнитах*, в коллоидном *гистерезисе*, в отрезке нерва, то надо думать, что в клетке, да еще в нервной, да еще кортикальной, передача следов от момента к моменту должна иметь первенствующую роль» [13] (Ухтомский, 1978, с. 602).

Другими словами, инерционность как центральное свойство доминанты, а с ним и все остальные свойства доминанты аналогичны коллективным эффектам в ферромагнетиках, в которых, как известно, существу-

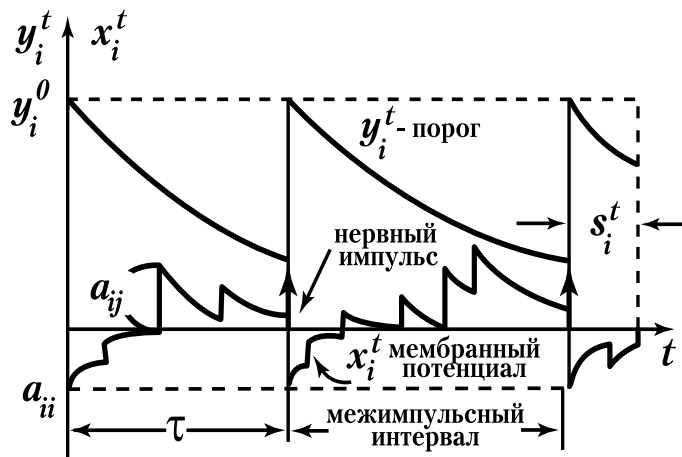


Рис. 1. Схематическое изображение допущений базовой модели нейронной сети

Генерация нервного импульса происходит в момент пересечения мембранного потенциала x_i^t (скачкообразный процесс) и затухающего порога y_i^t , где a_{ij} — синаптический вес связи с i -го на j -й нейрон — удовлетворяет условиям изинговского ($a_{ij} = 0, |i - j| > 1$) ферромагнетика ($a_{ij} > 0, |i - j| = 0, 1$). Главное отличие базовой нейронной модели от стохастической модели Изинга, со спинами в непрерывном пространстве состояний, в том, что в каждом узле плоской решетки развиваются локально-взаимодействующие процессы генерации нервного импульса, изображенные выше.

ет так называемое критическое замедление кинетики вблизи точки фазового перехода. Таким образом, А. А. Ухтомский предсказывает существование фазовых переходов и метастабильности в коре больших полушарий мозга: «На доминанту можно смотреть как на состояние *неустойчивого равновесия* молекул, способное к каталитическому (детонационному) разложению, в то время как обычные реакции — равновесие *обратимых реакций*» [14] (Ухтомский, 1996, с. 241).

Но если теория фазовых переходов и метастабильности в мозге способна единообразно объяснить все указанные свойства доминанты, тогда,

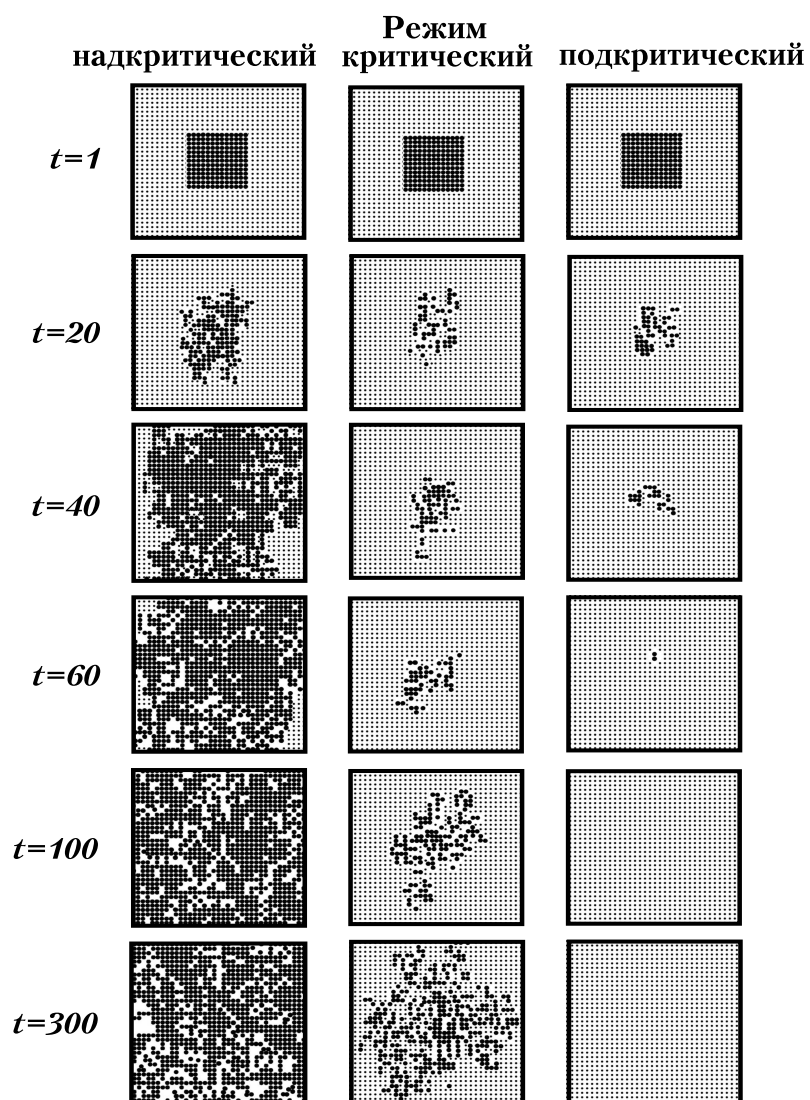


Рис. 2. Эффект сохранения пятна

учитывая их тесную связь с описанными выше проблемами внимания, мы получаем возможность решить все эти проблемы одновременно, если действительно окажется, что в коре больших полушарий происходят неравновесные фазовые переходы. Но как доказать, что фазовые переходы в мозге действительно происходят?

В последние годы концепцию неравновесных фазовых переходов в мозге развивает известный немецкий ученый Г. Хакен [39] (Haken, 1983), [40] (Haken, 1996). Он считает, что эта концепция будет полезна для теории мозга. В частности, он почти дословно повторяет А. А. Ухтомского, когда пишет, что «мозг работает вблизи точек неустойчивости, если сравнивать мозг с некоторой динамической системой» [39] (Haken, 1983, с. 603). Однако доказать существование фазовых переходов в мозге он не может в силу того, что его синергетическая модель мозга, по существу, — феноменологическая, а не микроскопическая, т. е. его модель заранее содержит утвердительный ответ на поставленный вопрос в предлагаемой им специальной форме дифференциального уравнения. Правильный подход здесь был бы в том, чтобы основным элементом модели взять не уравнение кинетики, а модельный пороговый нейрон с затуханием, учитывающий основные экспериментальные данные о связях и внутреннем устройстве реального нейрона. Тогда уже дело строгой математической теории ответить на вопрос о возможности или невозможности фазовых переходов в сети, собранной из таких «физиологических» нейронов. Именно этот подход был реализован в наших исследованиях. Краткая история вопроса такова.

Первой математической моделью нейронной сети с локальным взаимодействием, в которой удалось строго доказать существование кооперативного эффекта, соответствующего физическому фазовому переходу, была бесконечная сеть из формальных нейронов в дискретном времени, предложенная Ставской и Пятецким–Шапиро (1968, [11]). Условия отсутствия фазовых переходов для аналогичной модели в непрерывном времени привел Добрушин (1971, [3], [4]). Он же построил пример, основанный на кинетической модели Изинга, в котором фазовый переход действительно существует, и высказал гипотезу: для конечной сети локальное взаимодействие компонент приведет к очень длительному переходу в стационарное состояние, если параметры и начальные условия выбраны должным образом. Работа содержала по существу первую строгую по-

становку задачи об описании долгоживущих состояний в довольно широком классе марковских процессов. Существенным ограничением здесь, однако, оказалось *условие обратимости* процесса во времени, а также применимость лишь к сетям из формальных нейронов.

Литл [49] (Little, 1974) высказал гипотезу о существовании в мозге долгоживущих состояний по аналогии с магнитными доменами, возникающими в модели Изинга при температуре ниже критической. Нейроны у него снова формальные, время дискретное и марковская цепь *обратимая*, что оставляет гипотезу недоказанной и очень маловероятной.

В работе [6] (Крюков с соавт., 1986) предложена сравнительно несложная, но достаточно близкая к физиологии модель сети из неформальных нейронов, названная *базовой нейронной моделью*, и строго доказано существование в ней фазового перехода при некоторых жестких формальных ограничениях. Модель учитывает импульсную природу нейронной активности, экспоненциальное затухание мембранного потенциала и рефрактерность (рис. 1 на с. 79). Очевидно, что без учета этих факторов говорить о существовании фазовых переходов в нервной системе невозможно. Наоборот, доказав существование фазовых переходов в базовой модели, мы получили возможность сопоставить следствия, вытекающие из этого факта, с реальными экспериментами и, в конце концов, пришли к заключению, что фазовые переходы уже не только в модели, но и в реальном мозге действительно происходят. Изложим кратко последовательность шагов на этом пути.

Базовая модель представляет из себя марковскую систему, полученную из большого числа N первоначально независимых компонент, объединенных в систему с помощью локальных связей типа физического парного потенциала. Из микротeorии систем такого типа следует, что существование фазового перехода, когда N стремится к бесконечности, влечет при некоторых дополнительных условиях существование метастабильных состояний для конечных N . Численные эксперименты на ЭВМ подтвердили это положение. При этом был обнаружен новый «эффект сохранения пятна» (рис. 2 на с. 80), состоящий в том, что начальная констелляция активности нейронов в форме компактного пятна определенного размера вблизи критического режима имеет время жизни на несколько порядков превышающее характерные времена релаксации мембранного потенциала. Тем самым существование фазового перехода в базовой

модели открывало путь для разработки адекватной динамической теории кратковременной нейронной памяти как критического явления, существующего вблизи точки фазового перехода.

Довольно неожиданным оказалось, что небольшая модификация теории среднего поля, изложенная в работе [6] (Крюков с соавт., 1986) качественно объясняет большое количество очень трудно интерпретируемых экспериментов из самых различных отделов ЦНС, в том числе все основные свойства доминанты А. А. Ухтомского (табл. 2).

ТАБЛИЦА 2

Основные результаты исследования базовой модели

- Доказано существование «далекого порядка» при некоторых ограничениях. Предсказано существование метастабильного состояния.
- На имитационной модели получено подтверждение предсказанного эффекта метастабильности.
- Предложен и исследован нейронный осциллятор с необычными свойствами, основанный на эффекте метастабильности.
- Указанные результаты применены для интерпретации трудных для понимания данных из различных мозговых структур.
- Сделан вывод о том, что функциональной основой работы мозга являются метастабильные и неустойчивые состояния, как нейронный субстрат доминанты А. А. Ухтомского.

Экспериментальные подтверждения математической теории о существовании в нервной сети равновесных и неравновесных фазовых переходов и временно устойчивых состояний были собраны в той же работе из опубликованных до 1985 года данных по четырем нейронным структурам: гиппокампу, септуму, мозжечку и новой коре. То обстоятельство,

что одна и та же модель и один и тот же динамический эффект метастабильности оказались пригодными для объяснения большого набора трудных для понимания данных весьма непохожих нейронных структур свидетельствует о том, что мозг работает по единому принципу, а все различия между его структурами имеют, грубо говоря, количественный, а не качественный характер.

Мы приводим таблицу соответствия между фактами ферромагнетизма и данными нейрофизиологии (табл. 3 на с. 85), которая свидетельствует о неслучайности магнитной аналогии для мозга. Обращает на себя внимание прежде всего сходство, иногда тождественность понятий и терминов в столь различных областях (например, спонтанная активность, восприимчивость, гистерезис). Затем можно отметить значительное разнообразие весьма трудных для объяснения эффектов, которые кажутся самостоятельными, независимыми друг от друга, а по существу являются различными аспектами одного и того же явления фазового перехода.

Наконец, в последней строке таблицы записана гипотеза, которую высказывали прежде очень многие нейрофизиологи и специалисты по моделированию нервной системы. Теперь, на наш взгляд, она является неизбежным следствием всех приведенных нами фактов теоретических и экспериментальных.

Перечислим кратко, какие задачи и проблемы удается решить с помощью теории фазовых переходов в мозге. Существование фазовых переходов впервые позволило:

- понять механизм инерционности доминанты как критического замедления кинетики микроочагов;
- устранить основные дефекты реверберационной гипотезы кратковременной памяти, такие, как малый период рециркуляции и низкая его стабильность;
- представить непротиворечивую интерпретацию пяти локальных свойств доминантного очага;
- объяснить несколько парадоксов, связанных с динамикой электрической активности мозга при выработке и угашении условных рефлексов;

ТАБЛИЦА 3. Фазовые переходы и метастабильность в мозге (Крюков с соавт., 1986; см. [6])

Ферромагнетизм	Нейрофизиология
Далекий порядок	Корреляция активности удаленных нейронов
Спонтанная намагниченность	Спонтанная активность
Критическое замедление	Инерционность (Ухтомский, 1978; см. [13])
Критическое поле	Критический уровень деполяризации (Голиков, 1970; см. [2])
Критическое уширение автокорреляций	Уширение автокорреляций (Ebner, Bloedel, 1981; см. [32])
Критическая восприимчивость	Повышенная восприимчивость (Ebner, Bloedel, 1981; см. [32]). Повышенная реактивность (Голиков, 1970; см. [2])
Равновесный фазовый переход первого рода	Скачкообразные, случайные во времени переходы между возбужденными и тормозными состояниями (Colin et al., 1980; см. [25])
Неравновесный фазовый переход. Гистерезис	Выработка и угашение условного рефлекса (Мнухина, 1977; см. [8]). Гистерезис (Colin et al., 1980; см. [25])
Кластеры, домены	Микроочаги возбуждения

- предложить в качестве нейронной основы долговременной памяти микроочаги возбуждения в колонках новой коры;
- решить основную проблему мозжечка о функциональном назначении двух его основных входов и на этой основе предложить новую модель организации движения, как системы фазовой автоподстройки частоты; при этом единство восприятия и действия, требуемое принципом доминанты, реализуется взаимодействием двух идентичных систем фазо-частотного регулирования.

Существование долгоживущих микроочагов возбуждения позволяет выдвинуть следующее новое предсказание о конкретной форме связи долговременной и кратковременной памяти (рис. 3). Если кратковременную память отождествить с активностью ревербераторов, не обязательно синхронных, чаще асинхронных, а долговременную память — со стационарным локальным возбуждением в микроочагах в корковых слоях, то переход из одной формы в другую должен быть тождественным с хорошо изученным в теории доминанты переходом от локального стационарного возбуждения к распространяющемуся [2] (Голиков, 1970). При этом доминанта А. А. Ухтомского, как констелляция совозбужденных на одной частоте множества колонок — это способ «оживить» неактивные долговременные следы, легко и быстро отобрать из них лишь те, которые были «записаны» когда-то в аналогичной ситуации (т. е. при той же частоте и фазе колебаний), скомбинировать различные модальности в единый интегральный образ и снова перевести результат в неактивную форму стационарного возбуждения, хорошо защищенную от внешних и внутренних помех. Важно, что это предсказание относится, как к сенсорной, так и к двигательной системе. Недавно это предсказание до некоторой степени подтверждено в опытах по обучению новым движениям [21] (Brashers-Krug et al., 1996).

Однако проблема устойчивости доминанты, поставленная еще А. А. Ухтомским (1966, [12], с. 264), пока остается нерешенной. Теперь с учетом долгоживущих микроочагов возбуждения ее можно было бы сформулировать следующим образом: как совместить высокую надежность и устойчивость нейронной памяти (следы прошлых доминант) с принципиально неустойчивым режимом метастабильных состояний.

Предлагаемое ниже, в разделе «Нейролокатор — Центральный Управитель» (с. 96–104) решение проблемы устойчивости доминанты состоит

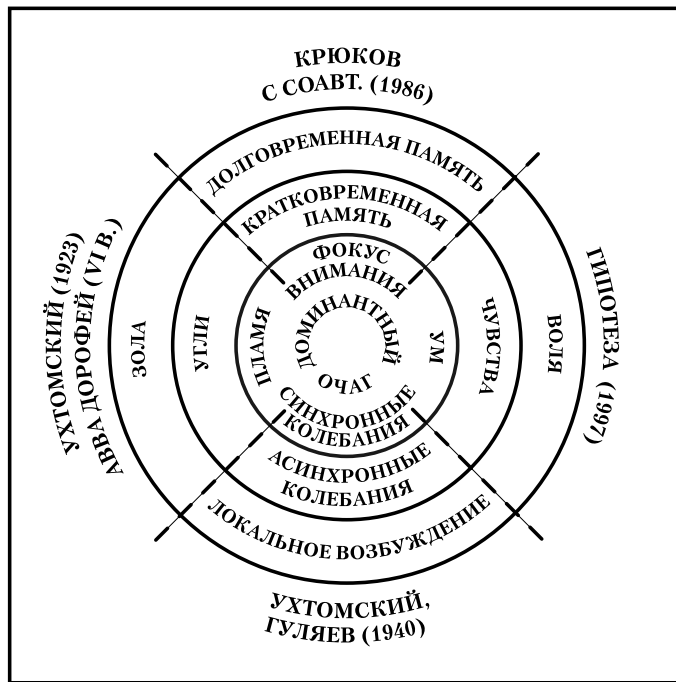


Рис. 3. Четыре представления доминанты А. А. Ухтомского

в том, что в мозге, кроме долгоживущих микроочагов возбуждения, должна существовать фазо-частотная следящая система, синхронизирующая эти микроочаги и вызывающая в них критический режим лишь на периоды времени, необходимые для фиксации или считывания информации из долговременной памяти. Здесь решение проблемы устойчивости можно уподобить равновесию движущегося велосипедиста: исходно неустойчивое состояние при определенных условиях оборачивается источником гибкого и экономного управления ЦНС с помощью *Центрального Управителя*. Эта новая концепция психологии, предложенная в работе [17] (Baddeley & Hitch., 1974) радикально меняет всю существующую архитектуру обработки информации в мозге.

Доминантная архитектура обработки информации в мозге

Мозг человека — многофункциональный орган, обеспечивающий, главным образом, целостность восприятия мира, фиксацию опыта, планирование, реализацию действий душевной и духовной жизни. Обработка сенсорной информации — не самая главная из его функций. Тем не менее, мы рассмотрим архитектуру такой обработки, отвлекаясь от высших психических функций, чтобы уяснить тесную связь внимания и памяти человека. Затем в следующем разделе кратко опишем входящие в нее компоненты.

Чтобы понять отличие доминантной архитектуры от более традиционной коннекционистской, напомним основные постулаты последней.

1. Функциональной единицей обработки информации является здесь нейроподобный элемент, формальный нейрон. Каждый элемент выполняет простую операцию над сигналами своих входов.
2. Вся информация накапливается в весах связи между элементами, которые модифицируются в процессе обучения на основе локальной информации по так называемому хеббовскому правилу.
3. Типичная коннекционистская архитектура представляется параллельной трехслойной сетью из таких элементов, в которых кроме входного и выходного слоя присутствует внутренний, «скрытый» слой. В вариантах архитектуры более развитых и лучше учитывающих данные нейробиологии число слоев и число входов может быть увеличено до четырех и более (рис. 4 на с. 89).
4. Наряду с локальными слоями иногда вводится так называемое глобальное рабочее пространство. Последнее выполняет роль коммутатора локальных пространств или локальных процессоров.
5. Внимание соответствует активации одного из локальных процессоров, функция которого в том, чтобы усилить, высветить, как прожектором, некоторую часть глобального рабочего пространства, усиливая ему соответствующие связи и ослабляя связи от мешающих слоев.

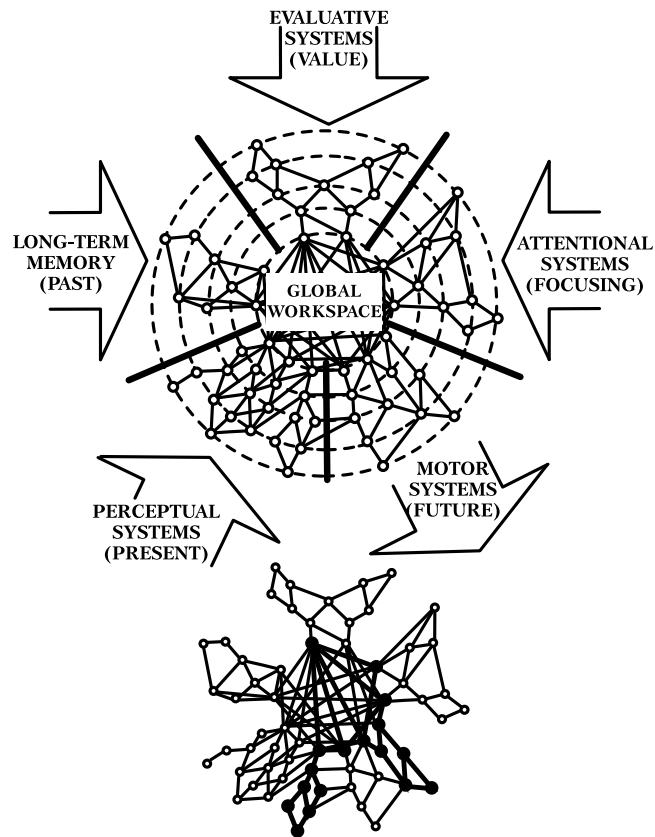


Рис. 4. Схема коннекционистской архитектуры (Dehaene et al, 1998; см. [31])

Вверху: Схематическое представление пяти главных процессов, взаимодействующих через глобальное рабочее пространство (global workspace): evaluative systems (value) — системы оценивания (значение); attentional systems (focusing) — системы внимания (фокусирование); motor systems (future) — моторные системы (будущее); perceptual systems (present) — системы восприятия (настоящее); long-term memory (past) — долговременная память (прошлое). *Внизу:* Пример активации при решении одной из задач распознавания: два процессора установили связь через глобальное рабочее пространство.

Доминантная архитектура отличается от коннекционистской в каждом из пяти указанных признаков.

1. Функциональной единицей является не одиночный нейрон, а сравнительно небольшая сеть из «физиологических» нейронов (пороговых импульсных элементов с затуханием), входящих в микроколонку коры и соединенных между собой таким образом, чтобы возник элементарный кортикальный осциллятор.
2. Информация накапливается в локальных очагах возбуждения в форме *графов изолабильности*. Элементы этого графа способны как к взаимной синхронизации на общей частоте, так и к затухающей активности, сохраняя при этом память о своей оптимальной лабильности.
3. Упрощенная доминантная архитектура, изображенная на рис. 5 (см. с. 89), представляется в виде системы из группы независимых периферических осцилляторов и одного центрального осциллятора, имеющего двусторонние связи с каждым из периферических.
4. Центральный осциллятор выполняет функции Центрального Управителя, «дирижера», способного изменять свою собственную частоту и вовлекать некоторые периферические осцилляторы в различные конstellации, условно показанные в нижней части рис. 5.
5. Появление внимания соответствует возникновению синхронных и до некоторой степени синфазных колебаний центрального и одного или нескольких периферических осцилляторов.

В целом, сравнивая эту схему с коннекционистской схемой (рис. 4), замечаем некоторое формальное их сходство. Однако, различие между ними принципиальное, качественное, и оно примерно соответствует различию между телеграфом и радиосвязью. В доминантной архитектуре все связи между осцилляторами, кроме одной — с центральным осциллятором, — функциональные, а не фиксированные. Поэтому здесь отсутствуют все известные проблемы коннекционизма, такие, как комбинаторный взрыв, катастрофа переполнения, катастрофа объединения и др. Более детально доминантная архитектура показана на рис. 6 (с. 92), где

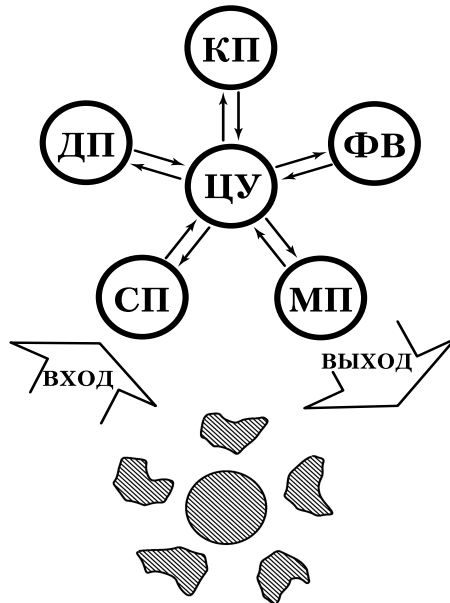


Рис. 5. Упрощенная схема доминантной архитектуры
Вверху: Схематическое представление пяти главных групп осцилляторов, взаимодействующих через центральный осциллятор. *Внизу:* Пример конstellации осцилляторов доминанты: все заштрихованные осцилляторы установили взаимную связь через центральный осциллятор. Все обозначения как на рис. 6.

учтены как свойства доминанты, так и данные психологии, нейропсихологии и нейрофизиологии [26] (Cowan, 1988), [53] (Miller, 1989), [74] (Vinogradova et al., 1991). Здесь, во-первых, учтено иерархическое строение доминанты: фокус внимания (ФВ) входит в кратковременную память (КП), а последняя, в свою очередь, входит в долговременную память (ДП), как это показано на рис. 3. Во-вторых, здесь явно указано возможное участие ЦУ во всех основных переходах и его отделенность от памяти [18] (Baddeley, 1996). В-третьих, в явном виде указаны все

возможные переходы из одной памяти в другую под действием ЦУ или внешних условий. В-четвертых, явно указана совместимость и до некоторой степени взаимозаменяемость сенсорной и двигательной систем, о чем мы писали в предыдущем разделе.



Рис. 6. Доминантная архитектура обработки сенсорной информации в мозге (Кругиков, 1991; см. [48])

СП — сенсорная память; КП — кратковременная память; МП — моторная память; ДП — долговременная память; ФВ — фокус внимания; ЦУ — Центральный Управитель.

Следует учесть, что на рис. 6 не показана явно важная черта доминантной архитектуры, связанная с регулированием общего неспецифического возбуждения или аразула, о чем будет речь в дальнейшем, а также не указаны реально существующие локальные связи между кортикальными осцилляторами, позволяющие сохранить некоторую работоспособ-

ность системы при отсутствии ЦУ. Однако в отсутствие ЦУ многие важные функции системы утрачиваются, что сравнимо по последствиям с удалением у человека такой важной структуры как гиппокамп. Утрачивается, например, способность переводить новую информацию из КП в ДП, сильно ухудшается способность к воспроизведению эпизодических событий [54] (Nadel & Moscovitch, 1998).

Итак, доминантная архитектура позволяет реализовать *последовательную* обработку поступающей информации от формирования ФВ до записи в ДП. Промежуточным, буферным состоянием в этом процессе является формирование КП. В ФВ находится та группа кортикальных осцилляторов, которая в данный момент синхронизирована по частоте и по фазе с ЦУ. Активированные внешним воздействием кортикальные осцилляторы, не входящие в ФВ или уже вышедшие из ФВ, образуют КП. Переключение ФВ не приводит к немедленной десинхронизации уже сформированной группы синхронных осцилляторов. Эти группы какое-то время сохраняют синхронность без контроля со стороны ЦУ. Благодаря этому осуществляется переход из КП в ДП. Для этого используется феномен *усвоения ритма*, описанный в разделе «Принцип доминанты и основные проблемы внимания» (см. с. 72) и в данном случае означающий, что осцилляторы, проработавшие достаточно большое время в синхронном режиме, постепенно меняют свою собственную частоту на ту, на которой они были синхронизованы. Эта частота, точнее, ей соответствующая *лабильность*, сохраняется и после угашения колебаний, она воспроизводится после того, как эти осцилляторы под внешним воздействием снова станут активными. Таким образом, запомненный в ДП паттерн активности может быть возвращен в КП или в ФВ. Попадание осцилляторов в ФВ может быть вызвано тремя причинами: появлением «нового»² стимула, заменой имеющегося стимула на «новый», спонтанной или целенаправленной активацией с помощью ЦУ. Последнее обеспечивает возможность ассоциативной связи между последовательными доминантными состояниями сети, генерируя, таким образом, связанную последовательность представлений (предметная «мысль» или «живое» движение).

²Под «новым» понимается не только отсутствующий в КП и ДП стимул, но и вообще любой другой стимул, достаточно сильный или биологически значимый, способный захватить ФВ.

Теперь приведем новые данные, существенно подтверждающие предложенную архитектуру.

1. КП и ДП имеют один и тот же нейронный субстрат в новой коре. Этот субстрат состоит из системы рассеянных, рассредоточенных по коре и перекрывающихся иерархически организованных сетей кортикальных нейронов [34], [35] (Fuster, 1998).
2. Одни и те же клетки входят в различные памятные конфигурации, включающие разные входы и разные модальности. В частности, такое совмещение имеет место в перцептивной и моторной коре [35] (Fuster, 1998b).
3. ЦУ по данным когнитивной психологии [18] (Baddeley, 1996) способен выполнять следующие функции:
 - координировать выполнение одновременно двух отдельных заданий;
 - генерировать последовательность представлений, извлекая их из долговременной памяти;
 - тормозить другие мешающие воздействия;
 - создавать ДП и ею манипулировать.
4. Гиппокамп играет критическую роль в образовании ДП [38] (Grasby et al., 1993), критическую роль в байндинге многих входов [24] (Cohen et al., 1999). Он нужен не только для записи информации в ДП, но и при считывании ее из ДП [54] (Nadel & Moscovitch, 1998). Эти данные подтверждают доминантную архитектуру, в которой ЦУ отделен от памяти, как гиппокамп отделен от новой коры.
5. Подтверждена гипотеза, что консолидация памятных следов осуществляется через образование кортикального клеточного ансамбля, который сообщает когерентность множеству рассеянных по неокортексу памятных следов, причем прерывание этой консолидации приводит к ухудшению памяти, наблюдаемой у амнестиком [56] (Paller, 1997).

6. Прерывание процесса консолидации заученных движений путем обучения второй двигательной задаче сразу же после обучения первой задаче приводит к разрушению моторной памяти первой задачи. Но такое разрушение отсутствует, если прошло четыре часа после обучения первой задаче. Сравнивая это наблюдение с консолидацией следов после сенсорного обучения, делается вывод, что две различные нейронные системы моторной и сенсорной памяти имеют сходные характеристики кодирования и запоминания новой информации [21] (Brashers-Krug et al., 1996). Заметим, что это есть лишь одно из следствий идентичности механизма этих систем, предсказанное в работе [48] (Kryukov, 1991).

Последний факт не потребует изменения предложенной архитектуры, изображенной на рис. 6, если мы предположим, что ЦУ содержит две параллельно работающие и, по-видимому, тесно взаимодействующие фазо-частотные управляющие системы. Причем, одна из них базируется на септо-гиппокампальной системе, а другая на оливо-мозжечковой, о чем была речь в одном из предыдущих разделов.

В заключение выскажем гипотезу о возможном взаимодействии *декларативной* и *процедурной* памяти, которые обычно противопоставляются друг другу: первая требует внимания, и ее содержание можно сообщить другим, в то время как вторая — автоматическая и поэтому уже не требует внимания, но и не сообщается другим. Гипотеза состоит в том, что декларативная память, реализуемая с помощью гиппокампальной системы [33] (Eichenbaum et al., 1996), с точки зрения теории автоматического управления принципиально не будет отличаться от *процедурной* (бессознательной, автоматической) памяти, если учесть, что последняя, подобно первой, реализуется системой фазо-частотной синхронизации на основе оливо-мозжечковой системы. По этой гипотезе обе системы могут работать на одной и той же частоте тета-ритма и могут до некоторой степени заменять одна другую. Не в этом ли причина удивительных данных о возможности обучения без сознания, об успешности бессознательной двигательной активности, о фактах слепого зрения (blindsight) и других загадочных явлениях, до сих пор не имеющих удовлетворительного объяснения [30] (Danckert & Goodale, 2000), [43] (Kentridge et al., 1999).

«Нейролокатор» — Центральный Управитель

Мозг во многих отношениях подобен радарной системе, причем, как на поведенческом, так и на нейронном уровне. Действительно: «Всякий раз, как имеется симптомокомплекс доминанты, имеется предопределенный ею вектор поведения» [12] (Ухтомский, 1966, с. 604)]. Подобную зависимость П. В. Симонов назвал «принципом радара», понимая под ним избирательную готовность мозга к ответу на определенный стимул при его поведении в среде, активный поиск этого стимула [10] (Симонов, 1981, с. 37). Еще точнее и конкретнее эта аналогия прослеживается в психологической теории человека-оператора [28] (Craig, 1948), где широко и успешно применяется теория автоматических следящих систем импульсного регулирования. Не удивительно, что похожие идеи неоднократно в прошлом выдвигались и на нейронном уровне. Так, в теории нейронной памяти Джон свою радарную аналогию организует вокруг центрального узла радарной системы — *компаратора*, осуществляющего сравнение времен прихода импульса запроса и импульса ответа из долговременной памяти (гипотеза детектора совпадения) [41] (John, 1967). Здесь Джон, *опираясь на доминанту А. А. Ухтомского*, высказал одну из важных идей теории нейронной памяти о том, что возможен почти мгновенный поиск конкретного памятного следа без всякого сканирования по всей памяти. Им будет наиболее вероятный пространственно-временной паттерн, лучше всего соответствующий заданным условиям внешней и внутренней среды животного, и будет именно тот, который наиболее легко отзывается на импульс запроса при заданном симптомокомплексе.

Поясним, что здесь под памятью, в соответствии с учением о доминанте понимается фиксация топологии коактивности нейронов в форме синхронизации по частоте и по фазе различных кортикальных и гиппокампальных областей на частоте тета-ритма [5] (Ливанов, 1975). Распознавание и считывание памятных следов соответствует возрождению прежде бывшей конфигурации коактивных нейронов при прежних или похожих условиях.

В работах [1] (Виноградова, 1975), [73] (Vinogradova, 1978), [75] (Vinogradova, 2001) подробно исследовано применение гипотезы компаратора к гиппокампу и новой коре, и эти результаты легли в основу «Нейролокатора». Итак, в соответствии с компараторной гипотезой Джона и Виноградовой, мозг, подобно радару, производит в подкорке запрос-

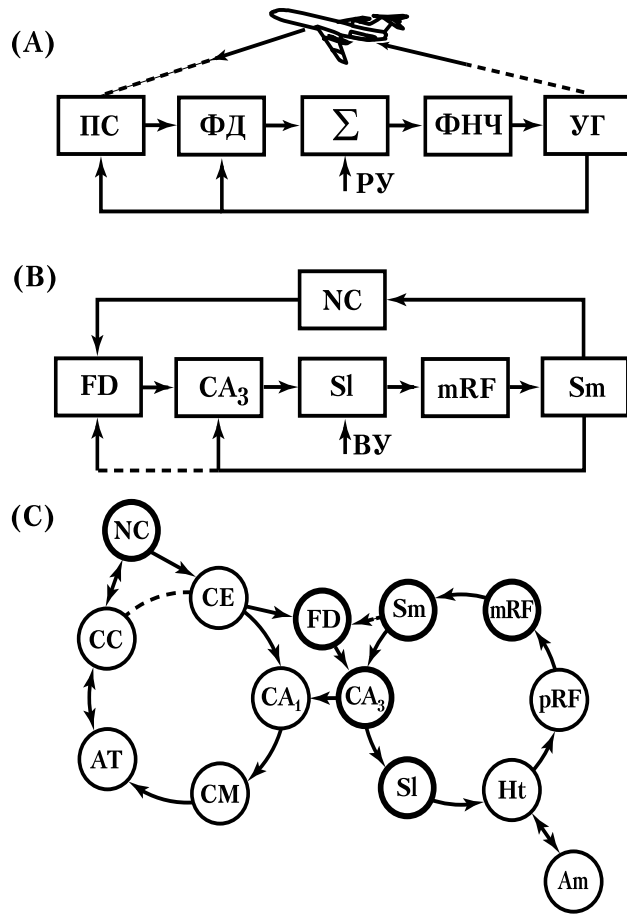
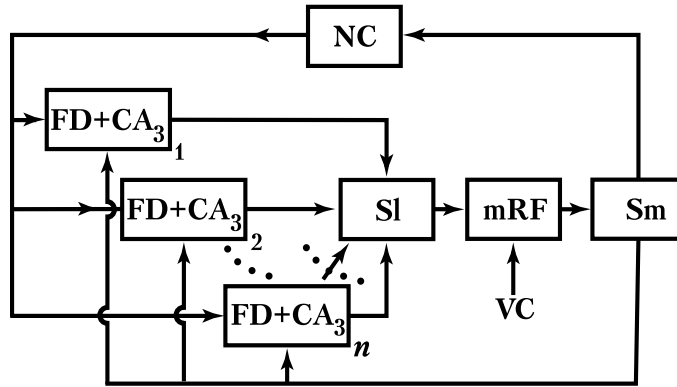


Рис. 7. Блок-схема радарной следящей системы (А), «нейро-локатора» (В) и лимбической системы мозга (С)
 ПС — приемник-смеситель; ФД — фазовый детектор или компаратор; Σ — сумматор; ФНЧ — фильтр низких частот; УГ — управляемый генератор; ПУ, ВУ — ручное и волевое управление, соответственно; NC — неокортекс; FD — зубчатая фасция; CA₁, CA₃ — поля гиппокампа; Sm, Sl — медиальное и латеральное ядро септума; mRF и pRF — мезенцефалическая и пентобулбарная часть ретикулярной формации (Виноградова, 1975; см. [1]).

ный импульс, посылает его во все корковые структуры мозга и после некоторой задержки получает оттуда ответ на свой запрос, наподобие радарного импульса, отраженного от цели. Ответный импульс, с помощью упомянутого компаратора, сравнивается с эндогенно-генерируемым опорным импульсом, и при совпадении их по частоте и фазе вырабатывается сигнал ошибки, уменьшающий возможное рассогласование по фазе между опорным и ответным импульсом. После нескольких таких успешных циклов совпадения на частоте тета-ритма в коре формируется целая *последовательность конфигураций* данного эпизода.

Упрощенная блок-схема обычной радарной следящей системы изображена на рис. 7А (с. 97), а ее нейронная реализация — на рис. 7В. При этом мы опираемся на хорошо установленные функции различных частей лимбической системы, описанные в книге [1] (Виноградова, 1975). Гиппокампальная зубчатая фасция (FD) — это смеситель и интегратор специфических входов; медиальный септум (Sm) — это синхронизатор не только для поля CA₃ гиппокамп, но и для многих других структур мозга; латеральный септум (Sl) — это выходной смеситель полей CA₃ отдельных ламелл, т. е. параллельных структурно-функциональных независимых секций гиппокампальной формации [15] (Amaral & Witter, 1989), соответствующих различным независимым группам кортикальных осцилляторов. Все эти структуры соединены между собой, образуя замкнутый контур, как показано на рис. 7С. Фактически весь комплекс лимбической структуры, частями которого являются выделенные выше структуры, организован в виде двух замкнутых контуров. Первый контур — информационный — включает в себя гиппокампальные поля CA₃ и CA₁, передний таламус, неокортекс, зубчатую фасцию и другие структуры, сохраняющие, по крайней мере частично, сигнальную специфичность. Второй контур — не специфическая регуляторная петля, включающая в себя ретикулярную формацию, гипоталамус, амигдалу и другие структуры, обеспечивающие неспецифическую активацию мозга или аразул. Заметим, что поскольку гиппокамп тормозит активирующую ретикулярную формацию (это хорошо установленный факт), вторая петля является фактически петлей отрицательной обратной связи как для регулирования аразула в мозге, так и для регулирования частоты септального осциллятора. Этот факт позднее будет использован для объяснения «сопряженного» торможения всех сигналов, не попавших в фокус внимания. Обе



$$\frac{d\varphi_i}{dt} = \Lambda_{oi} - \left[\sum_{j=1}^n A_{oj} g(\varphi_j) + N_j(t) \right] F(p), \quad (i=1, \dots, n)$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \Lambda_0 - [A g(\varphi) + N(t)] F(p), \quad (n=1)$$

Рис. 8. Блок-схема и уравнение «Нейролокатора» с учетом ламеллярности гиппокампа

NC — неокортекс; FD — зубчатая фасция; CA₃ — поле гиппокампа; Sm, SI — медиальное и латеральное ядро септума; mRF — мезенцефалическая часть ретикулярной формации; φ_i — разность фаз колебаний септального и i -го кортикального осцилляторов, Λ_{oi} — их частотная расстройка, A_{oi} — сила их связи; $g(\varphi)$ — нелинейная функция фазового дискриминатора; $N_i(t)$ — «белый» шум i -й ламеллы; $F(p)$ — передаточная функция блока усиления mRF.

петли имеют решающее значение для нашей модели, и они обе упрощенно изображены на рис. 7В. Детальное обсуждение всех остальных структур лимбической системы нам пока не потребуется, и мы представим только минимальный вариант системной модели, чтобы раскрыть главную функцию кортико-септо-гиппокампальной системы, которая, как мы полагаем, содержит основной секрет живого мозга.

ТАБЛИЦА 4

Основные свойства «Нейролокатора»

1. Внимание невозможно как при низком араузале ($AK < \Lambda_0$), так и при слишком высоком араузале ($AK \gg \Lambda_0$).
2. Внимание возникает скачком при возрастании араузала ($AK > \Lambda_0$) и проявляется как «выбор» одного из множества внешних сигналов того сигнала, который в данный момент и «захватывает» управление «Нейролокатора».
3. Внимание плавно контролируется изменением расстройки (Λ_0) как автоматически, так и волевым усилием.
4. Внимание унитарно, но при сравнительно невысоком араузале AK оно делимо по правилу Миллера (7 ± 2) или по правилу Коуэна (4 ± 0).
5. Срыв внимания может быть внезапным (в результате действия шумов или синхронизации от другого кортикального осциллятора) или градуальным. В последнем случае наблюдается интересный нелинейный эффект «проскальзывания цикла».

1. Системная модель «Нейролокатор» включает в себя шесть главных подсистем (см. рис. 7В): септальный осциллятор (S_m), M независимых кортикальных осцилляторов (NC), фазовый детектор или компаратор (CA_3), низкочастотный фильтр (mRF), входной смеситель (FD) и выходной смеситель (SI).
2. Каждая подсистема является небольшой модификацией базовой нейронной модели, описанной в разделе «Фазовые переходы в мозге и принцип доминанты» (см. с. 78–87), у которой некоторая часть возбуждительных нейронов получает входы от предшествующей подсистемы и у которой тормозной нейрон действует как выход подсистемы. Пороги тормозных нейронов предполагаются

**Основные психофизические данные, объясняемые
«Нейролокатором» (Крюков, 1991; см. [48])**

- высокая стабильность системной доминанты, несмотря на метастабильность и неустойчивость элементов системы;
- фокусированное, разделенное и регулируемое внимание;
- закон Еркеса–Додсона об оптимальном аразале;
- интеграция или мультимодальный синтез интегрального образа;
- струп-эффект или эффект внутри и межмодальной интерференции;
- одномоментное обучение;
- полифункциональность гиппокампа;
- привыкание и функция долговременной потенциации в гиппокампе;
- генерация временных последовательностей конфигураций.

фиксированными, однако пороги возбудительных нейронов изменяются у всех нейронов одновременно на величину, пропорциональную текущей неспецифической активации (аразал).

3. Все кортикальные осцилляторы имеют сенсорные входы определенной модальности, являясь, таким образом, анализатором свойств стимула (высоты звука, ориентации, яркости и т. д.). Их фиксированные пороги распределены таким образом, что средние частоты осцилляторов распределены равномерно, в альфа-тета частотном диапазоне.

ТАБЛИЦА 6

Новые данные, существенно подтверждающие системную модель внимания «Нейролокатор»

- гиппокамп критически необходим для интеграции множества входных сигналов (Cohen et al., 1999 – см. [24]; Verfaellie & Keane, 1997 – см. [72]);
- подтверждено существование «сопряженного» торможения доминанты: внимание к одному месту приводит к подавлению активности во всех остальных местах (Smith et al., 2000 – см. [63]);
- тэта-ритм, трудно наблюдаемый у человека в обычных условиях, появляется при выполнении когнитивных тестов (Kahana et al., 1999 – см. [42]; Sarnthein et al., 1998 – см. [59]);
- память находится не в гиппокампе, а в новой коре; гиппокамп играет ключевую роль в организации памяти человека (Parkin, 1996 – см. [57]; Tulving & Markowitsch, 1997 – см. [69]; Ungerleider, 1995 – см. [70]; Mesulam, 1998 – см. [52]);
- гиппокамп всегда необходим как для записи и консолидации, так и для воспроизведения разных видов памяти: пространственной, декларативной и эпизодической (Riedel et al., 1999 – см. [58]; Nadel & Moscovitch, 1998 – см. [54]);
- градиент ретроградной амнезии (Parkin, 1996 – см. [57]) свидетельствует об участии гиппокампа не только при регистрации, но и при считывании сенсорной информации.

4. Фазовый детектор поля CA_3 имеет два главных входа — септальный и неокортикальный. Септальный вход, по предположению, имеет фиксированную амплитуду, т. е. меру выраженности пачек импульсов; неокортикальный вход имеет переменную амплитуду $A = (\sum A_i)/M$, где A_i — мера пачечности в i -ом ламеллярном входе, которая зависит от араузала.
5. Низкочастотный фильтр mRF характеризуется передаточной функцией $F(p) = K/(1 + Tp)$. (Так как K действует на систему наподобие A , то мы их объединяем, считая AK одним параметром, измеряющим араузал).
6. Главное предположение модели состоит в том, что внимание может быть описано операционно как глобальное свойство системы, блок-схема которой представлена на рис. 7В, и это свойство соответствует фазовой синхронизации многих первоначально независимых кортикальных осцилляторов на доминантной частоте.
7. Когда число синхронизованных кортикальных осцилляторов превысит критическое значение, оптимальные лабильности осцилляторов уравниваются, т. е. осцилляторы усваивают общий ритм и соответственно меняют собственную частоту.

Как было показано [44] (Kirillov et al., 1989), все указанные выше функции могут быть реализованы с помощью одной и той же базовой нейронной модели, но при различных значениях параметров. В работе [47] (Kryukov et al., 1990) показано, что система описывается интегродифференциальным уравнением, представленным на рис. 8.

Эти уравнения почти аналогичны системе уравнений стандартной фазовой следящей системы, обобщенной на случай нескольких синхронизованных осцилляторов [7] (Линдсей, 1978, с. 131). На этом основании мы в приводим основные свойства «Нейролокатора» как стандартной фазовой следящей системы 1-го порядка, т. е. для случая, когда $F(p) = K$ — см. табл. 4 на с. 100.

В работе [48] (Kryukov, 1991) показано, что «Нейролокатор» способен объяснить большой набор классических психологических эффектов, перечисленных в табл. 5 на с. 101.

Основное предсказание «Нейролокатора» (1991)

В ЦНС существует фазо-частотная следящая система по меньшей мере второго порядка, управляющая вниманием и памятью человека и функционирующая в диапазоне частот альфа и тета-ритмов. В этой системе септо-гиппокампальная формация играет ведущую роль задающего осциллятора и фазового дискриминатора. Эта система, взаимодействуя с другими корковыми и подкорковыми структурами (такими, например, как mRF), выполняет функции Центрального Управителя.

За последнее время появилось огромное количество новых данных, которые можно рассматривать как подтверждение модели «Нейролокатора». Приведем лишь некоторые из них (табл. 6 на с. 102). Более полный перечень новых подтверждений а также новых данных, необъяснимых с помощью существующих моделей внимания, но подходящих для «Нейролокатора», мог бы стать предметом отдельной работы.

Все указанные выше новые данные свидетельствуют о справедливости основного предсказания модели «Нейролокатор» (табл. 7), сформулированного в работе (Круиков, 1991; см. [48]).

Заключительные замечания

Мы утверждаем, что существует совместное одновременное решение всех шести проблем моделирования внимания, описанных во Введении. И это решение дается моделью доминанты А. А. Ухтомского. Все, что нам осталось сделать, это описать физический механизм, лежащий в основе доминанты и выразить его в терминах текущих психологических и нейробиологических исследовательских работ. Сделав это по отношению к каждой проблеме, упомянутой выше, мы резюмируем наши результаты следующим образом.

I. Проблема селективности стимулов. «Нейролокатор» выбирает группы кортикальных осцилляторов на основе способности этих осцилляторов усваивать единый ритм и единую систему управления с помощью частотно фазовой синхронизации на частоте тета-ритма. Сам процесс выбора происходит при специальных условиях, подобных условиям физического фазового перехода. В частности, необходима малая взаимная частотная расстройка между субкортикальными и кортикальными осцилляторами и достаточно сильные двусторонние связи между ними.

II. Проблема долговременной памяти. Функциональным элементом нашей модели внимания является не одиночный нейрон, а небольшой ансамбль, локальная группа нейронов (субмодуль), который способен произвести кооперативные действия, кооперативный эффект локально-стационарной активности («эффект сохранения пятна»). Под действием внешней стимуляции и неспецифической активации от ретикулярной формации эта локальная активность переходит в колебательную, распространяющуюся по сети активность. Знания импульсной активности и схемы синаптических соединений нейронов недостаточно в нашей модели, чтобы объяснить этот переход, потому что градуальные и «шумовые» компоненты мембранного потенциала существенны для понимания происходящих процессов. В статье предполагается, что этот переход является механизмом фактического перехода кратковременной памяти в долговременную и обратно. Долговременная память — это свойство нервной ткани поддерживать почти неизменной свою оптимальную лабильность, установленную предшествующей доминантой.

III. Проблема интеграции локальной активности в единый цельный образ решается в нашей модели путем фазочастотной синхронизации большого числа удаленных друг от друга модулей с помощью или локальных связей, или с помощью Центрального Управителя, или с помощью обоих этих механизмов. Возникающее при этом частотно-фазовое кодирование в системе инвариантно к действию большой группы преобразований внешних сигналов, обеспечивая, таким образом, инвариантное распознавание объектов. Поскольку при таком синтезе интегрального образа нет необходимости устанавливать постоянные связи между коактивированными модулями, то и исчезают коннекционистские проблемы, такие, как комбинаторный взрыв, экспоненциальный рост числа связей при увеличении числа входов и другие проблемы. В частности, динамическое

соединение элементов эквивалентно в коннекционистских терминах введению в архитектуру обработки «скрытого слоя» произвольно высокого порядка. Эта же метафора может помочь сторонникам коннекционизма уяснить себе необычные ассоциативные функции гиппокампальной формации [65] (Sutherland, & Rudy, 1989). Однако следует подчеркнуть, что метафора «скрытого слоя» дает только частичное объяснение очень сложной функции гиппокампа, подробно описанной в работе [47] (Kryukov, et al., 1990).

IV. Проблема инерции решается в модели автоматическим возникновением критического режима во время активного восприятия внешних стимулов. Отдельные модули и вся система внимания в целом работают вблизи точки неустойчивого равновесия, которое является ближайшим аналогом физического эффекта метастабильности. Он сопровождается так называемым критическим замедлением системной динамики, что и объясняет временной зазор между психологическим и нейробиологическим масштабами времени. Долгоживущие кортико-гиппокампальные реверберации обеспечивают, в частности, состояния, необходимые для решения многих жизненных проблем «на линии». Достаточно продолжительное критическое состояние является необходимым для фиксации информации в процессе консолидации путем отключения соответствующих осцилляторов от входных воздействий и стимулов. Однако энграммы запоминаемой информации нигде не накапливаются, а распределены по всей системе в форме локальных возбуждений. Они могут быть восстановлены в целостный образ, путем преобразования их в распространяющиеся колебания, после того, как принимается стимул, напоминающий первоначальный. Такая память практически безгранична по емкости, поскольку она хранится в неактивном состоянии локального возбуждения, а каждый нейрон может быть активно вовлечен во множество различных доминантных конфигураций.

V. Проблема торможения и подавления помех. Кроме торможения за счет десинхронизации, в модели «Нейролокатор» автоматически действует «сопряженное» торможение и торможение по типу «торможения возвращения» [45] (Klein, 2000).

VI. Проблема Центрального Управителя. Функции, которые способен выполнять Центральный Управитель, очень обширны: наряду с перечнем, приведенным в работе [18] (Baddeley, 1996) сюда относятся та-

кие функции: интеграция, выделение «новизны», селекция объектов, различного вида память (декларативная, эпизодическая, семантическая, рабочая, кратковременная, долговременная, одномоментная), кодирование, считывание, консолидация, генерация последовательностей. Некоторые из этих функций недавно были промоделированы пушинской группой математиков [20] (Borisuyk et al., 2001). Нейролокатор решает проблему моделирования этих функций *все одновременно и совместно*.

В заключение приведем замечание о современном состоянии теории мозга. В 1979 году Ф. Крик [29] (Crick, 1979) предсказывал: «... если прорыв в изучении мозга действительно произойдет, он, вероятно, будет на уровне всеобщего управления системой. Если бы система была бы такой хаотической, какой она иногда представляется, она была бы неспособной выполнять удовлетворительно даже простейшие задания. Возможным хотя и маловероятным примером будет открытие, что мозговая обработка продвигается регулированием фазы некоторого рода периодическим устройством, наподобие компьютера, и оно, вероятно, составило бы главный прорыв».

В 1995 году фон дер Малсбург уже более определенно предсказывает [51] (Malsburg, 1995): «Мы в середине научной революции, результатом которой будет установление интеграции как фундаментального аспекта нейронного кода наряду с классическим частотным кодом. В случае удачи, эта революция приведет к плодотворным парадигмам, превосходящим текущую сосредоточенность на одиночную клетку к более внутренне согласованным концепциям функций мозга и восприятия и к решению многих остающихся проблем в терминах явных моделей».

В этом предсказании уже яснее проявляются черты будущего прорыва как общей закономерности науки, по замеченной еще Томасом Куном³ неизбежности научных революций для преодоления застойных явлений и отживающих парадигм.

Примерно в это же время другой крупный исследователь мозга С. Роуз в своей книге [9] (Роуз, 1995) пишет: «Согласно концепции Имре Лакатоша, поступательное движение науки осуществляется путем «исследовательских программ». Программа может быть прогрессивной, и в этом случае она реализуется в постановке задач, которые могут быть решены в

³См. Кун Т. Структура научных революций. 2-е изд.: Пер. с англ. – М.: Прогресс, 1977. – 300 с. (Серия «Логика и методология науки». – Прим. ред.)

ее рамках, оставаясь плодотворной в отношении познания мира, или она может быть дегенеративной, тогда она будет порождать все более выраженные аномалии. В этом смысле ассоциационистская программа Хебба прогрессивна, поскольку может включить в кэнделовский «клеточный алфавит памяти» и *долговременную потенцию* в качестве модельного механизма, тогда как эксперименты Гарсиа и мои эксперименты с повреждением мозга — это такие аномалии, которые могут указывать на дегенеративный характер хеббовской программы; иными словами, нам нужна революция, если использовать термин Куна». Заметим, что упомянутая здесь *долговременная потенция*, согласно обзора большого числа экспериментальных работ [62] (Shors & Madzel, 1997), признана непригодной в качестве модельного механизма обучения.

Кто же из них прав? В середине ли мы научной революции, или она еще не началась? Судя по тому, что теоретики мозга, в отличие от экспериментаторов, почти нигде не пишут о дегенеративном характере хеббовской программы, революция еще не начиналась. Почти все теоретики мозга ищут не истину, а подтверждения хеббовской программы, приняв гипотезу за незыблемый факт. А истина лежит совсем в другом месте — в учении А. А. Ухтомского о доминанте.

Литература

1. *Виноградова О. С.* Гиппокамп и память. М.: Наука, 1975.
2. *Голиков Н. В.* Проблема местного и распространяющегося возбуждения в современной нейрофизиологии // В сб.: Механизмы местной реакции и распространяющегося возбуждения. — Л.: Наука, 1970.
3. *Добрушин Р. Л.* Марковские процессы с большим числом локально взаимодействующих компонент — существование предельного процесса и его эргодичность // Пробл. передачи информ. — 1971. — т. 7, вып. 2. — с. 70–87.
4. *Добрушин Р. Л.* Марковские процессы с большим числом локально взаимодействующих компонент — обратимый случай и некоторые обобщения // Пробл. передачи информ. — 1971. — т. 7, вып. 3. — с. 57–66.
5. *Ливанов М. Н.* Нейронные механизмы памяти // Успехи физиол. наук. — 1975. — т. 6. — с. 66–89.
6. *Крюков В. И., Борисюк Г. Н., Борисюк Р. М., Кириллов А. Б., Коваленко Е. И.* Метастабильные и неустойчивые состояния в мозге. — Пущино, 1986.
7. *Линдсей В.* Системы синхронизации в связи и управлении: Пер. с англ. — М., 1978.

8. Мухина П. С. О механизме замыкания связи в свете теории Введенского-Ухтомского // В сб.: Механизмы нервной деятельности. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – с. 112–126.
9. Роуз С. Устройство памяти. От молекул к сознанию: Пер. с англ. – М.: Мир, 1995.
10. Симонов П. В. Эмоциональный мозг. – М.: Наука, 1981.
11. Ставская О. Н., Пятецкий-Шапиро И. И. Об однородных сетях из спонтанно-активных элементов // Пробл. кибернетики. – Вып. 20, 1968. – с. 91–106.
12. Ухтомский А. А. Доминанта. – М.: Наука, 1966.
13. Ухтомский А. А. Избранные труды. М.: Наука, 1978.
14. Ухтомский А. А. Интуиция совести. – СПб.: 1996.
15. Amaral D. G., Witter M. P. The three-dimensional organization of the hippocampal formation: A review of anatomical data // Neuroscience. – 1989. – 31(3). – pp. 571–591.
16. Alvarez P., Squire L. R. Memory consolidation and the medial temporal lobe: A simple network model // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 1994. – v. 91. – pp. 7041–7045.
URL: <http://www.pnas.org/cgi/reprint/91/15/7041>
17. Baddeley A. D., Hitch G. J. Working memory // In G. Bower, Ed.: Recent advances in learning and motivation, Vol. 8. – New York: Academic Press, 1974. – pp. 47–90.
18. Baddeley A. D. Exploring the central executive // The Quarterly J. of Experimental Psychology. – 1996. – v. 49A. – pp. 5–28.
19. Baddeley A., Della Sala S. Working memory and executive control // Philos. Trans. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci. – 1996. 29;351(1346). – pp. 1397–1403.
20. Borisyuk R. M. et al., 2001.
URL: <http://www.tech.plym.ac.uk/soc/staff/roman/person.htm>
21. Brashers-Krug T., Shadmehr R., Bizzi E. Consolidation in human motor memory // Nature. – 1996. – 382(6588). – pp. 252–255.
22. Braver T. S., Cohen J. D. Working memory, cognitive control, and the prefrontal cortex: Computational and empirical studies // Cognitive Processing. – 2001. – v. 2. – pp. 25–55.
23. Britten K. H. Cortical neurophysiology. Attention is everywhere // Nature. – 1996. – 382. – pp. 497–498.

24. *Cohen N.J., Ryan J., Hunt C., Romine L., Wszalek T., Nash C.* Hippocampal system and declarative (relational) memory: summarizing the data from functional neuroimaging studies // *Hippocampus*. – 1999. – 9(1). – pp. 83–98.
25. *Colin F., Manil J., Desclin J.C.* The olivocerebellar system. I. Delayed and slow inhibitory effects: an overlooked salient feature of cerebellar climbing fibers // *Brain Res.* – 1980. – v. 187. – pp. 3–27.
26. *Cowan N.* Evolving conceptions of memory, storage, selective attention and their mutual constraints within human information processing systems // *Psych. Rev.* – 1988. – v. 104, pp. 163–191.
27. *Cowan N.* Attention and memory: An integrated framework // *Oxford Psychology Series, No. 26.* New York: Oxford University Press. – 1995. (Paperback edition: 1997)
28. *Craik K.J.W.* Theory of the human operator in control. I. The operator as an engineering system. II. Man as an element in control system // *Brit. J. Psychol., Gen. Sect.* – 1948. – v. 38. – pp. 56–61, 142–148.
29. *Crick F.* Thinking about the brain // *Sci. Am.* – 1979. 241. – pp. 181–189.
30. *Danckert J., Goodale M.A.* Blindsight: A conscious route to unconscious vision // *Current Biology*. – 2000. v. 10. – pp. R64–R67.
URL: <http://download.bmn.com/pdf/journals/list/>
31. *Dehaene S., Kerszberg M., Changeux J.-P.* A neuronal model of a global workspace in effortful cognitive tasks // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* – 1998. – v. 95, – pp. 14529–14534.
URL: <http://www.pnas.org/cgi/reprint/95/24/14529>
32. *Ebner T.J., Bloedel J.R.* Temporal patterning in simple spike discharge of Purkinje cells and its relationship to climbing fiber activity // *J. Neurophysiol.* – 1981. – v. 45. – pp. 933–947.
33. *Eichenbaum H., Schoenbaum G., Young B., Bunsey M.* Functional organization of the hippocampal memory system // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* – 1996. – v. 93(24). – pp. 13500–13507.
URL: <http://www.pnas.org/cgi/reprint/93/24/13500>
34. *Fuster J.M.* Cellular dynamics of network memory // *Z. Naturforsch [C]*. 1998. – v. 53. – pp. 670–676.
35. *Fuster J.M.* Distributed memory for both short and long term // *Neurobiol. Learn. Mem.* – 1998. – v. 70(1/2). – pp. 268–274.
36. *Fuster J.M.* The prefrontal cortex — an update: time is of the essence // *Neuron*. – 2001. – v. 30. – pp. 319–333.

37. *Goldman-Rakic P.S.* Regional and cellular fractionation of working memory // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* – 1996. – v. 93, pp. 13473–13480.
URL: <http://www.pnas.org/cgi/reprint/93/24/13473>
38. *Grasby P.M., Frith C.D., Friston K., Frackowiak R.S., Dolan R.J.* Activation of the human hippocampal formation during auditory-verbal long-term memory function // *Neurosci. Lett.* – 1993. – v. 163(2). – pp. 1851–1888.
39. *Haken H.* Synopsis and introduction // In: *Synergetics of the Brain / (E. Basar, H. Flohr, H. Haken, A. J. Mandell, Eds.).* – N.Y.: Springer, 1983. – pp. 3–25.
40. *Haken H.* Principles of brain functioning: A synergetic approach to brain activity, behavior and cognition. Berlin; New York: Springer, 1996.
41. *John E. R.* Mechanisms of memory. – New York: Academic Press, 1967.
42. *Kahana M.J.* Human theta oscillations exhibit task dependence during virtual maze navigation // *Nature.* – Jun. 1999. – 24; 399(6738). – pp. 781–784.
43. *Kentridge R.W., Heywood C.A., Weiskrantz L.* Attention without awareness in blindsight // *Proc. R. Soc. Lond. B. Biol. Sci.* – Sep. 1999. 7; 266(1430). – pp. 1805–1811.
44. *Kirillov A. B., Borisyuk G.N., Borisyuk R.M., Kovalenko Ye. I., Makarenko V.I., Chulaevsky V.A., Kryukov V.I.* A model of neural oscillator for a unified submodule // In: *Advance in Neural Information Processing Systems I / D.S.Touretzky (Ed.),* San Mateo, CA: Morgan Kauffman, 1989. – pp. 560–567.
45. *Klein R.M.* Inhibition of return // *Trends in Cognitive Science.* – 2000. – v. 4. – pp. 138–147.
46. *Koch C., Ullman S.* Shifts in selective visual attention, 1985, 4, pp. 219–227.
47. *Kryukov V.I., Borisyuk G.N., Borisyuk R.M., Kirillov A.B., Kovalenko Ye. I.* Metastable and unstable states in the brain // In: *Stochastic Cellular Systems: Ergodicity, Memory, Morphogenesis / Eds.: R.L. Dobrushin, V.I. Kryukov and A.L. Toom,* Manchester, UK and New York, NY: Manchester Univ. Press. – 1990. – pp. 226–357.
48. *Kryukov V.I.* An attention model based on the principle of dominant // In: *Neurocomputers and Attention. I: Neurobiology, Synchronization and Chaos / Eds.: A. V. Holden, V. I. Kryukov.* – Manchester University Press, 1991. – pp. 319–351.
49. *Little W.A.* The existence of persistent states in the brain // *Math. Biosci.* – 1974. – v. 19. – pp. 101–120.
50. *Lu Z.-L., Williamson S.J., Kaufman L.* Physiological measures predict behavioral lifetime of human auditory sensory memory // *Society for Neuroscience Abstracts* 18, 1992. – pp. 1212.

51. *von der Malsburg C.* Binding in models of perception and brain function // *Current Opinion in Neurobiology.* – 1995. – v. 5. – pp. 520–526.
52. *Mesulam M.-M.* From sensation to cognition // *Brain.* – 1998. – v. 121. – pp. 1013–1052.
53. *Miller R.* Cortico-hippocampal interplay: Selforganizing phase-locked loops for indexing memory // *Psychobiol.* – 1989. – v.17. – pp. 115–128.
54. *Nadel L., Moscovitch M.* Hippocampal contributions to cortical plasticity // *Neuropharmacology.* – 1998. – v. 37(4–5). – pp. 431–439.
55. *Newman J., Grace A.A.* Binding across time: The selective gating of frontal and hippocampal systems modulating working memory and attentional states // *Consciousness and Cognition.* – 1999. – v. 8. – pp. 196–212.
56. *Paller K.A.* Consolidating dispersed neocortical memories: The missing link in amnesia // *Memory.* – 1997. – v. 5(1–2). – pp. 73–88.
57. *Parkin A.J.* Human memory: The hippocampus is the key // *Curr. Biol.* Dec. 1996. v. 1; 6(12). – pp. 1583–1585.
URL: <http://download.bmn.com/pdf/journals/list/>
58. *Riedel G., Micheau J., Lam A.G., Roloff E., Martin S.J., Bridge H., Hoz L., Poeschel B., McCulloch J., Morris R.G.* Reversible neural inactivation reveals hippocampal participation in several memory processes // *Nat. Neurosci.* Oct. 1999. v. 2(10). – pp. 898–905.
59. *Sarnthein J.* Synchronization between prefrontal and posterior association cortex during human working memory // *Proc. Nat. Acad. Sci. USA.* Jun. 1998. – v. 9; 95(12). – pp. 7092–7096.
URL: <http://www.pnas.org/cgi/reprint/95/12/7092>
60. *Schillen T.B., Konig P.* Binding by temporal structure in multiple feature domains of an oscillatory neuronal network // *Biol. Cybern.* – 1994. – v. 70(5). – pp. 397–405.
61. *Sejnowsky T.J.* Open questions about computation in cerebral cortex // In: *Parallel Distributed Processing. Exploration in Microstructure of Cognition, Vol. 2: Psychological and Biological Models / McClelland J. L., Rumelhart D. E. & PDP Research Group.* – MIT Press. – 1986. – pp. 372–389.
62. *Shors T.J., Matzel L.D.* Long-term potentiation: What's learning got to do with it? // *Behavioral and Brain Sciences.* – 1997. – v. 20(4). – pp. 597–655.
URL: <http://www.cogsci.soton.ac.uk/bbs/Archive/bbs.shors.html>
63. *Smith A. T., Singh K. D., Greenlee M. W.* Attentional suppression of activity in the human visual cortex // *Neuroreport.* – Feb. 2000. – v. 7; 11(2). – pp. 271–277.

64. *Strong G. W., Whitehead B. A.* A solution to the tag-assignment problem for neural networks // Behavioral and Brain Sciences. – 1989. – v. 12. – pp. 381–433.
65. *Sutherland R. J., Rudy J. W.* Configural association theory: The role of the hippocampal formation in learning, memory and amnesia // Psychobiol. – 1989. v. 17. – pp. 129–144.
66. *Tesche C. D., Karhu J.* Theta oscillations index human hippocampal activation during a working memory task // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. – 2000. v. 97. – pp. 919–924. URL: <http://www.pnas.org/cgi/reprint/97/2/919>
67. *Treisman A., Gelade G.* A feature integration theory of attention // Cognitive Psychology. – 1980. – v. 12. – pp. 97–136.
68. *Treisman A.* The binding problem // Current Opinion in Neurobiology. – 1996. – v. 6. – pp. 171–178.
69. *Tulving E., Markowitsch H. J.* Memory beyond the hippocampus // Current Opinion in Neurobiology. – 1997. – v. 7. – pp. 209–216.
70. *Ungerleider L. G.* Functional brain imaging studies of cortical mechanisms for memory // Science. – 1995. Nov. 3. – No. 270(5237). – pp. 769–775.
71. *Uusitalo M. A., Williamson S. J., Seppa M. T.* Dynamical organisation of the human visual system revealed by lifetimes of activation traces // Neurosci Lett. – 1996, Aug. 9. – v. 213(3). – pp. 149–152.
72. *Verfaellie M., Keane M. M.* The neural basis of aware and unaware forms of memory // Semin. Neurol. – Jun. 1997. v. 17(2). – pp. 153–161.
73. *Vinogradova O. S.* Discussion // In: Function of Septo-Hippocampal System. – Amsterdam: Elsevier, 1978. – p. 402.
74. *Vinogradova O. S., Brazhnik E. S., Stafekina V. S.* Septo-hippocampal system. Rhythmic oscillations and information selection // In: Neurocomputers and Attention. I: Neurobiology, Synchronization and Chaos / Eds.: A. V. Holden, V. I. Kryukov. – Manchester University Press, 1991.
75. *Vinogradova O. S.* Hippocampus as comparator: Role of the two input and two output systems of the hippocampus in selection and registration of information // Hippocampus. – 2001. v. 11(5). – pp. 578–598.
76. *Zipser D., Kehoe B., Littlewort G., Fuster J.* A spiking network model of short-term active memory // J. Neurosci. – Aug. 1993. – v. 13(8). – pp. 3406–3420.

Игумен Феофан (Крюков), кандидат физико-математических наук, игумен Свято-Данилова монастыря. Область научных интересов — теория функций мозга, взаимодействие науки и религии.