

# УНИВЕРСАЛЬНАЯ СХЕМА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НЕЙРОННЫХ МОДУЛЕЙ ДЛЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

*Нуйдель И.В., Соколов М.Е., Яхно В.Г.*

*Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*

*В статье дана характеристика универсальной схемы взаимодействия нейронных модулей, реализующих механизм прерывания входного сенсорного сигнала. Приведены подобные схемы связей нейрональных модулей для таламо-кортикалной системы, системы базальных ганглиев, гиппокампа, мозжечка.*

**Ключевые слова:** симуляторы нейронных сетей, таламо-кортикалная система, модели однородных распределенных нейроноподобных систем.

## Введение

В настоящее время активно разрабатываются функциональные модели (симуляторы) нейронных сетей, архитектура которых основана на особенностях структуры и принципах работы реальных нейронов и нейрональных модулей как крупных элементах структурно-функциональной организации мозга. Исследование динамики работы таких систем на моделях, несомненно, приведёт к пониманию процессов обработки информации в мозге.

Из нейрофизиологических данных о строении и работе различных реальных систем мозга следует, что в них много сходного. Известно, что слоистая структура хорошо выражена в коре и гиппокампе, а таламус состоит из ядер. И в коре и в таламусе характерна четкая локализация: представительство периферических рецепторных участков в соответствующих участках вышележащих структур. То есть для зрительной системы характерна «ретинотопическая» организация (для соматосенсорной системы - «соматотопическая»). В отделах мозга, задействованных в разных циклах обработки информации, организуется прерывание входного сенсорного сигнала. Именно этот важный универсальный механизм рассматривается в данной работе в приложении к разным системам в мозге человека и животных.

### **Механизм прерывания входного сенсорного сигнала.**

#### **1. Таламо-кортикалная система**

В целом процесс обработки информации (например, изображений) в коре головного мозга непрерывен и проявляется в

эволюции структур пространственной активности нейронов коры, с одной стороны.

С другой стороны, логично, если процесс первичной обработки сенсорного сигнала будет прерываться. Выдвинутая в работах R.Hecht-Nielsen [1-3] гипотеза о прерывании входного сенсорного сигнала кажется нам вполне правдоподобной, так как во временные интервалы, когда входной сигнал не проходит в кору, сигналы могут передаваться для последующей обработки (например, формирования ассоциативных связей) и распознавания из зон первичной обработки (например, зрительная кора для зрительных сигналов) в высшие корковые структуры. Однозначного объяснения функциональной роли такой прерывистой обработки пока нет.

В экспериментальных нейрофизиологических исследованиях выявлено, что взаимосвязанные нейрональные модули: кора, ретикулярные ядра таламуса, специфический таламус играют важную роль в процессах обработки информации.

В работах R.Hecht-Nielsen [1-3] механизм периодического прерывания входного сенсорного сигнала также связывается с этими структурами мозга.

В таламо-кортикалной системе в режиме нормальной обработки информации происходит стробирование входного сигнала во времени и выделение из сигнала простейших признаков (например, контура или линий разных направлений, объектов заданного размера, крестов, ромбов и других признаков), которые задействованы в обработке информации. В работах Шевелева [4,5] было высказано предположение, что сигнал с таламуса приходит в разные

участки коры (отвечающие за выделение разных признаков) со сдвигом фазы, вызванным временной задержкой. Этот сдвиг фазы обуславливает асинхронную работу в клетках коры в процессе обработки информации в норме.

Нарушение этого нормального функционирования в реальности проявляется в различных формах эпилепсии с разной этиологией или органическими изменениями в мозге, когда процесс восприятия информации нарушается. Нервный субстрат остаётся неизменным, но система переходит в режим автоколебаний, чем обусловлено нарушение процесса восприятия. У человека известно несколько видов эпилепсии, в частности неконвульсивная абсансиальная эпилепсия, в основе которых лежит пароксизмальная ритмическая активность таламо-кортикалной цепи нейронов. Пароксизмальная активность нейронов обуславливается синхронизацией электрической активности нейронных ансамблей в различных модулях и отражается на электроэнцефалограмме повышением частоты и амплитуды колебаний (рис.1). Для неё характерно возникновение в коре и подкорковых структурах пик-волновых разрядов широко генерализованной спонтанной высокоамплитудной активности.

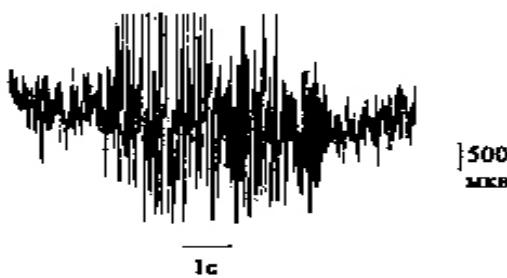


Рис. 1. Типичный высокоамплитудный разряд одного из видов эпилепсии [6].

Нейрофизиологический механизм возникновения разрядов «пик-волна» абсансиальной эпилепсии достаточно подробно изучен на животных. Пик-волновые разряды у человека «устроены» так же, как у животных. Показано [7], что этот вид пароксизмальной синхронизированной ритмической активности связан с возникновением возбуждения в нейрональной цепи: кора - ре-

тикулярные ядра таламуса – специфический таламус.

Именно поэтому рассмотрение динамики формирования двумерных картин активности, выявление качественных особенностей обработки сенсорных сигналов в нормальных режимах и условий нарушения нормальных режимов представляются очень важными при моделировании и интерпретации различных функциональных режимов, реализуемых в таламо-кортикалной системе.

## 2. Схема взаимодействия нейронных модулей.

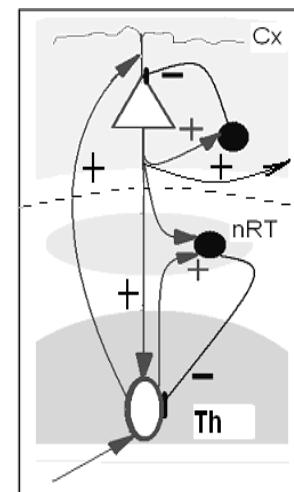


Рис. 2. а – таламо - кортикальные связи [7];  
б - взаимосвязи пирамидных нейронов и интернейронов коры (Cx) и ядер таламуса: сенсорного (Th) и ретикулярного (nRT) [7].

Взаимодействующие звенья таламо-кортикалной цепи и определяют архитектуру модели. Структура одного нейронного модуля состоит из ансамблей пирамидных нейронов и тормозных интернейронов коры, нейронов специфических таламических ядер (специфические ядра, Th) и тормозных нейронов ретикулярного ядра таламуса (неспецифические ядра, nRT), связанных между собой. Схема показана на рис.2 [7]. Знаками «+» и «-» показаны возбудительные и тормозные связи соответственно. Стрелка в нижней части рисунка – сенсорный вход в таламус.

Таламус – сложное полифункциональное образование, включающее релейные ядра, где переключается афферентация от органов чувств в соответствующие области

коры больших полушарий. То есть в специфических (сенсорных, или релейных) ядрах таламуса происходит синаптическое переключение сенсорной информации с аксонов восходящих афферентных путей на следующие, конечные нейроны, отростки которых идут в соответствующие сенсорные проекционные области коры больших полушарий. Например, специфическим ядром зрительной сенсорной системы является латеральное коленчатое тело (ЛКТ, LGN), имеющее прямые связи с затылочными (зрительными) проекционными областями коры больших полушарий [7].

В нормальных условиях функционирования в таламо-кортикалльной системе происходит следующее: 1). Внешний сигнал активирует вначале нейроны специфического (релейного) ядра таламуса (Th). 2). По таламо-кортикалльному пути возбуждение поступает в кору (Cx). Причем корковые пирамиды связаны с тормозными интернейронами, которые могут определенным образом модулировать их активность. 3). Дальнейшее распространение возбуждения происходит по нисходящим корково-таламическим путям к специфическому и ретикулярному (nRT) ядрам таламуса. 4). Последнее, т. е. (nRT), связано с релейным ядром таламуса тормозными связями и может прерывать поступление возбуждения из специфического таламического ядра в кору. При этом, длительность паузы зависит от длительности тормозного постсинаптического потенциала (ТПСП), создаваемого nRT. После окончания ТПСП цикл повторяется. Ретикулярное ядро таламуса является своеобразными воротами для сенсорной информации, поступающей в кору [7]. Оно не имеет прямого выхода на кору. Вместе с тем оно получает входы от коры и других ядер таламуса и, по видимому, выполняет функцию внутриталамического регулятора [8].

Тормозное влияние nRT заканчивает «строб» активности, во время которого происходит выделение признака исходного сигнала в коре; за ним следует период неактивности.

В результате, после прохождения входного сигнала через нейронные ансамбли

таламо-кортикалльной системы на нейронных ансамблях коры формируется прерывистое, стробированное представление исходного сигнала.

Можно предположить, что в течение «строба» обработки информации проходит полный цикл от подачи сенсорного сигнала до формирования образа. Таким образом, если получить в моделируемой системе активность, аналогичную стробированию с выделением признаков, то можно сопоставить параметры системы с нейрофизиологическими данными [8].

### **Система «таламус - базальные ганглии»**

Исследователей сегодня интересует роль таламуса в цепи таламус - базальные ганглии. Установлено, что эта система «отвечает» за эмоциональное восприятие стимула, внимание, распознавание и формирование настроения [9].

Связи нейрональных модулей в цепи таламус - базальные ганглии таковы, что, возможно, реализуется прерывание сенсорного сигнала.

К ядрам системы базальных ганглиев относятся, ядра черной субстанции, стриатум, состоящий из двух ядер - путамена и хвостатого ядра, и бледный шар, состоящий из двух частей (внутренней и наружной), а также субталамическое ядро. Система базальных ганглиев тесно связана с другими мозговыми двигательными центрами - моторной (двигательной) корой и моторными ядрами таламуса и играет ключевую роль в осуществлении произвольных движений.

В работах И.Г.Силькис [10] предложен механизм внимания, согласно которому его влияние на обработку зрительных стимулов запускается выделением дофамина в стриатуме. При непроизвольном внимании к выделению дофамина приводит активация стимулом через таламус стрионигральных клеток и последующее растормаживание через базальные ганглии нейронов верхнего двухолмия. При произвольном внимании к выделению дофамина приводит активация префронтальной коры. Увеличение реакций корковых нейронов на

стимул, на который направлено внимание, и подавление реакций на другие стимулы является результатом разнонаправленного модулирующего действия дофамина на эффективность сильных и слабых корково-стриатных входов.

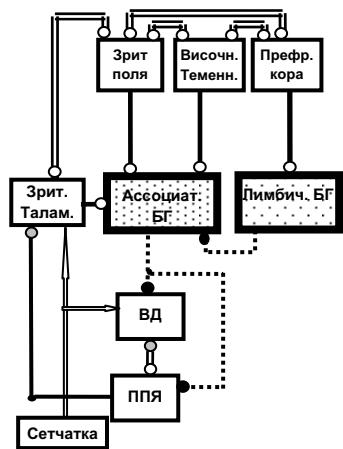


Рис.3. Упрощенная схема ассоциативной и лимбической цепи кора - базальные ганглии - таламус - кора, участвующей в обработке зрительной информации. Зрит. талам.- таламические ядра, участвующие в передачи зрительной информации из сетчатки в кору; ВД - верхнее двухолмие; ППЯ - педункулопонтальное ядро; маленькие белые и черные кружки - возбудительные и тормозные синапсы; маленькие серые кружки - холинергические входы; толстые и пунктирные линии - сильные и слабые связи, соответственно [10].

Это приводит к изменению выходных сигналов из базальных ганглиев (“фильтра внимания”), которые через таламус оказывают соответственно растормаживающее и ингибирующее действие на первоначально сильно и слабо возбужденные корковые нейроны. Из модели следует, что вниманием могут модулироваться только те компоненты ответов, чья латентность превышает латентные периоды реакций дофаминергических нейронов на зрительные стимулы (80-100 мс).

Согласно предположенному механизму, появлению реакций дофаминергических клеток на зрительный стимул способствует активация этим стимулом верхнего двухолмия, а также активация через таламус

“прямого” растормаживающего пути через базальные ганглии в верхнее двухолмие. Префронтальная кора, активируемая зрительным стимулом через медиодорзальное таламическое ядро, может осуществлять нисходящее влияние на активность дофаминергических клеток, контролируя выделение дофамина одновременно в разных участках стриатума и способствуя связыванию в цельный образ нейронных паттернов, отражающих отдельные свойства зрительного стимула.

Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что роль базальных ганглиев в когнитивной обработке информации неспецифична по отношению к модальности стимулов или контексту задачи [11]. Это говорит об унифицированности процессов обработки сигналов в цепях кора – базальные ганглии – таламус – кора, которые не зависят от того, какая из сенсорных или лимбических областей коры включена в эту цепь.

Предложенный И.Г.Силькис метод анализа механизмов участия ассоциативных и лимбических цепей кора - базальные ганглии - таламус - кора в обработке зрительной информации может использоваться и для понимания механизмов таких феноменов, как зрительное воображение, зрительное внимание, осознанное восприятие, а также мотивационно-эмоциональные воздействия на восприятие сенсорной информации.

Упрощенная схема ассоциативной и лимбической цепи кора - базальные ганглии - таламус - кора (см. рис.3), участвующей в обработке зрительной информации, подтверждает предположение о строении входного сигнала [10]. Кроме того, из схемы видно, что связи аналогичны связям в таламо-кортикальной системе (восходящие связи возбуждающие, нисходящие – тормозные).

### Связи в гиппокампе

Согласно упрощенной схеме циркуляции эмоций, считается, что эмоциональное возбуждение возникает в гиппокампе, затем переходит в гипotalамус и через передние ядра таламуса в поясную извилину

и другие подкорковые центры. Ход возбуждения по кругу *Пейпецца* показан стрелками на рисунке. Сам гиппокамп - "родоначальник" эмоций - имеет мощные связи с центром Брука (участок коры, управляющий речедвигательных органами, ответственный за воспроизведение речи) [12].



Рис.4 Ход возбуждения по кругу Пейпецса.

В процессах обработки информации в гиппокампе важную роль играет тета-ритм [13, 14, 15].

В работах Р.М. Борисюка с соавторами [15] выдвинута гипотеза нейронной схемы, включающей гиппокамп и другие структуры. «В соответствие с этой гипотезой, тета-ритмические колебания генерируются не в одной структуре, а возникают в результате взаимодействия нейронной активности между нейронными популяциями, расположеными в различных структурах, включая гиппокамп. Такие взаимодействующие популяции образуют нейронную схему (обычно представляющую как замкнутую петлю), включающую популяции нейронов, принадлежащие различным структурам. Такая схема может генерировать тета-ритм и, тем самым, гиппокампальный тета является лишь одним из проявлений тета-ритмической активности, существующей в большой нейронной системе. Одна из таких распределенных схем включает нейронные популяции гиппокампа и медиального септума (ядра перегородки, рис. 4), соединенные прямыми и обратными связями».

Модель септо-гиппокампальной схемы включает четыре нейронных популяции:

возбуждающую популяцию пирамидных нейронов поля CA1, тормозную популяцию интернейронов поля CA1, тормозную популяцию интернейронов медиального септума и еще одну тормозную популяцию интернейронов поля CA1 гиппокампа. Связи между этими популяциями направлены в одну сторону и образуют замкнутую петлю с одной возбуждающей и тремя тормозными популяциями. Эта модель [14] перспективна в плане объяснения механизма генерации тета-ритма. Идея о септальном генераторе тета-ритма в виде распределенной популяции регулярных нейронов септума управляемых пейсмекером, была сформулирована в работах О.С. Виноградовой.

Рассмотренные гипотезы и модели [14, 15] коррелируют с гипотезой о механизме прерывания сенсорного сигнала в процессе обработки информации и в гиппокампе.

### Межнейрональные связи в коре мозжечка

Мозжечок (cerebellum, малый мозг) — одна из интегративных структур головного мозга, принимающая участие в координации и регуляции произвольных, непроизвольных движений, в регуляции вегетативных и поведенческих функций [16].

Морфофункциональная организация и связи мозжечка имеют следующие особенности:

1) кора мозжечка построена достаточно однотипно, имеет стереотипные связи, что создает условия для быстрой обработки информации;

2) основной нейронный элемент коры — клетка Пуркинье, имеет большое количество входов и формирует единственный аксонный выход из мозжечка, коллатерали которого заканчиваются на ядерных его структурах;

3) на клетки Пуркинье проецируются практически все виды сенсорных раздражений: проприоцептивные, кожные, зрительные, слуховые, вестибулярные и др.;

4) выходы из мозжечка обеспечивают его связи с корой большого мозга, со стволовыми образованиями и спинным мозгом.

Клетки Пуркинье, выстроенные в один ряд, имеют самую мощную в центральной нервной системе дендритную систему. На дендритном поле одной клетки Пуркинье может быть до 60 000 синапсов. Эти клетки выполняют задачу сбора, обработки и передачи информации. Аксоны клеток Пуркинье являются единственным путем, с помощью которого кора мозжечка передает информацию в его ядра и ядра структуры большого мозга (рис. 5).

Известно, что мозжечок получает копию афферентной информации, передаваемой из спинного мозга в кору полушарий головного мозга, а также эфферентной — от двигательных центров коры полушарий к спинному мозгу. Первая сигнализирует о текущем состоянии регулируемой переменной (мышечный тонус, положение тела и конечностей в пространстве), а вторая даёт представление о требуемом конечном состоянии. Сопоставляя первое и второе, кора мозжечка может рассчитывать ошибку, о которой сообщает в двигательные центры. Так мозжечок непрерывно корректирует и произвольные, и автоматические движения.

В результате тормозного влияния слоёв 1 и 3 на слой клеток Пуркинье, в мозжечке также реализуется прерывание сигнала с сенсорных раздражителей.

Возможно, коррекция произвольных и автоматических движений, производится в фазы прерывания сигнала.

### Заключение

По данным литературы, схемам организации различных систем мозга и данным о динамике преобразования сигналов в настоящей работе рассмотрено четыре примера, когда поступающие в мозг сенсорные сигналы проходят через одинаковым образом организованные нейрональные модули: они содержат как минимум три связанные структуры, в которых восходящие связи для сенсорных сигналов — возбуждающие, а обратные, управляющие, — тормозные. Это необходимо для реализации механизма прерывания сенсорного сигнала, что должно, предположительно, обеспечивать условия передачи сигнала в период

«неактивности» в стробе на более высокий уровень обработки.

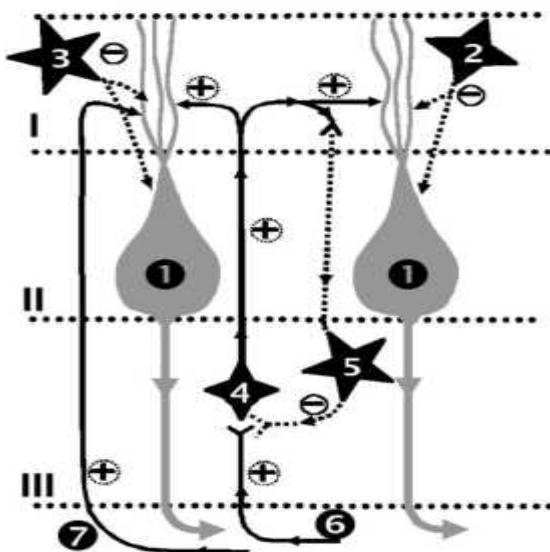


Рис.5. Межнейроидные связи в коре мозжечка: I - молекулярный слой; II - ганглионарный слой; III - зернистый слой.

1 - клетки Пуркинье; 2 - звездчатые клетки; 3 - корзинчатые клетки; 4 - зернистые нейроны; 5 - звездчатые клетки Гольджи; 6 - моховидные волокна; 7 - лазящие волокна. «+» - активирующие (возбуждающие) влияния; «-» - тормозные влияния.

Следовательно, такую организацию процессов преобразования сенсорных сигналов в нейронных структурах управления можно считать инвариантом. Поэтому, функциональные модели таких систем могут также претендовать на универсальность и для них важно изучить возможные варианты динамических режимов обработки сигналов.

### Литература

1. Robert Hecht-Nielsen A Theory of Cerebral Cortex// UCSD (University of California, San Diego) Institute for Neural Computation Technical Report #0401, 2004
2. R.Hecht-Nielsen. Replicator neural networks for universal optimal source coding // Science, 269, 1960-1863, 29 September 1995.
3. R.Hecht-Nielsen. A theory of the cerebral cortex // Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Molecular Electronics and

- Biocomputing, Future Electronic Devices Association of Japan, Okinawa, 28-30 November 1995
4. И.А.Шевелёв Волновые процессы в зрительной коре мозга // «Природа», №12, 2001, [http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/12\\_01/ALPHA.HTM](http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/12_01/ALPHA.HTM)
  5. Шевелёв И.А. Нейроны зрительной коры. Адаптивность и динамика рецептивных полей. М.:Наука, 1984, 232с.
  6. Г.Д. Кузнецова, А.В. Габова, М.Е. Соколов Исследование механизмов поддержания и окончания статуса абсанской эпилепсии // Труды конференции. Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях - 2011. Нижний Новгород 2011. стр. 107-109.
  7. Douglas A., Coulter. Thalamocortical Anatomy and Physiology, Epilepsy: A Comprehensive Textbook // J. Engel (ed.), Jr. and T.A.Pedley, Lippincott Raven Publisher: Philadelphia, 1997. 341p.
  8. В.Г.Яхно, И.В.Нуйдель, А.Е.Иванов «Модельные нейроноподобные системы. Примеры динамических процессов» В кн. "Нелинейные волны - 2004", Отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин, Ниж. Новгород: ИПФ РАН, 2005, с.362-375.
  9. Suzanne N. Haber, Roberta Calzavara The cortico-basal ganglia integrative network: The role of the thalamus // Brain Research Bulletin 78. 2009. P. 69-74.
  10. Силькис И.Г. Вклад синаптической пластичности в базальных ганглиях в обработку зрительной информации (гипотетический механизм) // Журн. высш. нерв. деят. 2006. Т. 56. №6.
  11. Ramanathan S., Hanley J.J., Deniau J.M., Bolam J.P. Synaptic convergence of motor and somatosensory cortical afferents onto GABAergic interneurons in the rat striatum // J. Neurosci. 2002. V. 22. №18. P.8158–8169.  
<http://www.dicotor.ru/2010/02/zaikanie-i-psychology.html>
  12. Н.Н.Данилова Психофизиология. Учебник для вузов // АСПЕНТ ПРЕСС, Москва, 2000.
  13. Г.Н.Борисюк, Р.М.Борисюк, Я.Б.Казанович, Г.Р.Иваницкий, УФН, 2002, Т.172, №10, с. 1189-1212.
  14. Роман Борисюк, Моделирование гиппокампального тета-ритма, Журнал высшей нервной деятельности, 2004, том 54, №1, с.85-100.
  15. Физиология человека. Под ред. Покровского В.М., Коротко Г.Ф., учебник 2-е изд., перераб. и доп. - М.: 2003. - 656 с.

## UNIVERSAL SCHEME OF NEURON INTERACTION MODULE FOR FUNCTIONAL MODELING OF INFORMATION PROCESSING<sup>1</sup>

*Nuidel I.V., Sokolov M.E., Yakhno V.G.*

*The paper presents the characteristics of the universal scheme of interaction between neural modules. These modules implement mechanism of interrupting input sensor signal. Such schemes of neuronal connections modules are given for thalamus - cortex systems, basal ganglia, hippocampus and cerebellum.*

**Keywords:** simulation of neural networks, thalamus – cortex system model, neuron-like homogeneous distributed systems.

---

<sup>1</sup> Статья подготовлена к публикации по итогам третьей всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» и представляет собой дополненный по итогам дискуссии доклад, представленный на этой конференции.