



СИМУЛЯТОР ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СЕНСОРНЫХ СИГНАЛОВ В ТАЛАМО-КОРТИКАЛЬНЫХ СЕТЯХ

М.Е. Соколов, Г.Д. Кузнецова, И.В. Нуйдель, В.Г. Яхно

В настоящее время активно разрабатываются модели (симуляторы) нейронных сетей, архитектура и дизайн которых основаны на особенностях структуры и принципах работы реальных нейронов и нейробиологических систем. Разработка нейроподобных моделей, основанных на данных об архитектуре связей в мозге, нацелена на выяснение принципов работы его нейронных структур. Исследование динамики работы таких цепей на моделях очень важно для понимания процессов обработки информации в мозге, а также при различных нарушениях их работы и формирования патологической активности.

В экспериментальных нейрофизиологических исследованиях выявлено, что взаимосвязанные нейрональные модули – кора, ретикулярные ядра таламуса, специфический таламус – играют важную роль в процессах обработки информации. Поэтому очень важно выяснить, как преобразуется входной сигнал в этих отделах мозга и какие внутренние процессы могут ограничить и полностью нарушить их совместную работу. Одним из вариантов таких нарушений является эпилепсия.

В работе приведены результаты последних расчетов на функциональной модели взаимодействия нейрональных модулей в процессе обработки информации в таламо-кортикальной системе.

Ключевые слова: Симуляторы нейронных сетей, нейроморфные модели, таламо-кортикальные цепи.

Введение

В активном состоянии и животные и человек воспринимают и обрабатывают множество входных сигналов, поступающих из внешней среды. Нормально работающий мозг обрабатывает многомерные потоки сенсорной информации, представленные в виде двумерных сигналов пространственной активности нейронных ансамблей. В экспериментальных нейрофизиологических исследованиях выявлено, что взаимосвязанные нейрональные модули – кора, ретикулярные ядра таламуса, специфический таламус – играют важную роль в процессах обработки информации. Однозначного объяснения функциональной роли такой обработки пока не существует. Идеи работ R. Hecht-Nielsen [1,2] натолкнули нас на рабочую интерпретацию, что функциональные операции в таламо-кортикальных цепях в основном связаны

с периодическим прерыванием поступающей в кору сенсорной информации. Эти идеи использовались при моделировании процессов в предыдущих работах [3–5]. В таламо-кортикальной 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 когнитивных процессах. Рассмотрение динамики формирования двумерных картин активности, выявление качественных особенностей обработки сенсорных сигналов в нормальных режимах и условий нарушений нормальных режимов представляются очень важными при моделировании и интерпретации функциональных режимов, реализуемых в таламо-кортикальной системе (рис. 1). В нормальном режиме (при обработке информации) колебания электрической активности в отделах мозга асинхронные и низкоамплитудные, что видно на регистрируемых электроэнцефалограммах, снятых с различных зон коры.

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 остается неизменным, но система переходит в режим автоколебаний, чем обусловлено нарушение процесса восприятия. У человека известно несколько видов эпилепсии (в частности, абсансная эпилепсия), в основе которых лежит пароксизмальная ритмическая активность таламо-кортикальной цепи нейронов. Пароксизмальная активность нейронов обуславливается либо синхронизацией электрической активности нейронных ансамблей в различных модулях, либо чрезмерной активностью в них и отражается на электроэнцефалограмме повышением частоты и амплитуды колебаний (рис. 2). Для нее характерно возникновение в коре и подкорковых структурах пик-волновых разрядов широко генерализованной спонтанной высокоамплитудной активности.

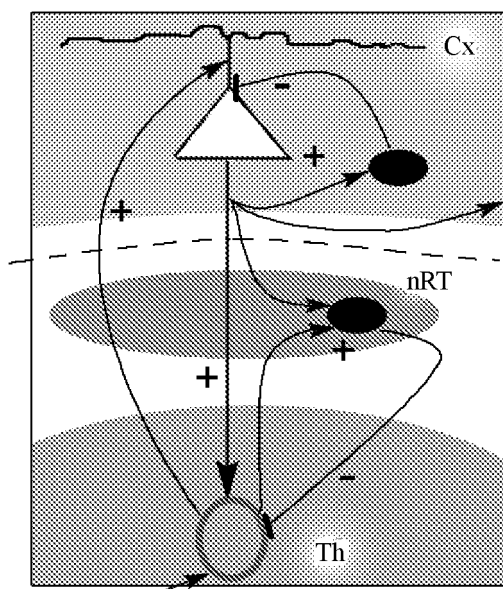


Рис. 1. Взаимосвязи пирамидных нейронов и интернейронов коры Cx и ядер таламуса: сенсорного Th и ретикулярного nRT [6]

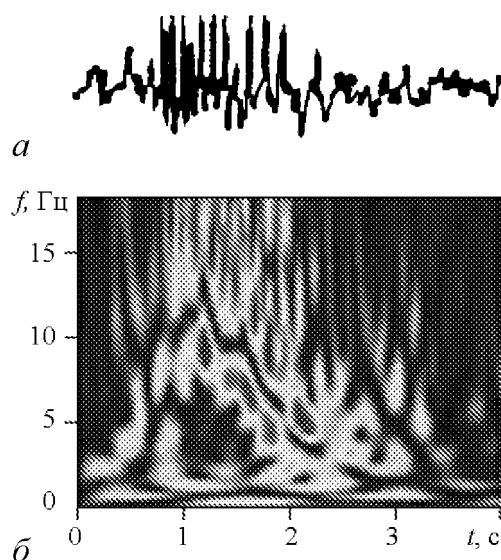


Рис. 2. Типичный высокоамплитудный разряд одного из видов эпилепсии [7]

Нейрофизиологический механизм возникновения пик-волновых разрядов абсансной эпилепсии достаточно подробно изучен на животных. Пик-волновые разряды у человека «устроены» также, как у животных. Показано, что этот вид пароксизмальной синхронизированной ритмической активности связан с возникновением возбуждения в нейрональной цепи: кора – ретикулярные ядра таламуса – специфический таламус*.

Взаимодействующие звенья таламо-кортикальной цепи и определяют архитектуру модели. Структура одного нейронного модуля состоит из ансамблей пирамидальных нейронов и тормозных интернейронов коры, нейронов специфических таламических ядер (специфические ядра, Th) и тормозных нейронов ретикулярного ядра таламуса (неспецифические ядра, nRT), связанных между собой [6, рис. 1]. Знаками «+» и «-» показаны возбуждательные и тормозные связи, соответственно. Стрелка в нижней части рисунка – сенсорный вход в таламус.

В модель включены четыре взаимосвязанных нейронных модуля, в каждый из которых входят нейронные ансамбли коры, интернейронов коры, нейронов таламуса и ретикулярных ядер таламуса. В модели нейронные ансамбли коры одного модуля воздействуют на нейронные ансамбли других модулей. Состояние модуля описывается четырьмя переменными, определяющими распределение возбуждения в соответствующих нейронных ансамблях. Функциональные схемы моделируемых систем получены из исследований мозга. Экспериментальные данные используются для привязки параметров системы и полученных режимов к реальным процессам в коре и таламусе при развитии ритмической активности в таламо-кортикальной цепи в течение разряда «пик-волна» [7].

В нормальном режиме (при обработке информации) колебания электрической активности в отделах мозга асинхронные и низкоамплитудные, что видно на регистрируемых электроэнцефалограммах, снятых с различных зон коры.

На рис. 2, а показана запись разряда (калибровка 1 с, 500 мкВ) от лобной коры у пациента с абсансной эпилепсией; на рис. 2, б показано модифицированное вейвлет-преобразование, демонстрирующее частотно-временную структуру разряда.

Возникновение ритмических высокоамплитудных разрядов в результате синхронной работы нескольких нейрональных модулей является основной чертой всех видов эпилепсий, в том числе и абсансной эпилепсии. Поэтому в данной работе предпринято моделирование механизмов перехода от нормальной работы системы к пароксизмальной патологии, возникающей в таламо-кортикальной цепи.

Постановка задачи

На первом этапе работы задача состоит в том, чтобы на модели получить режимы нормальной активности и посмотреть, как происходит обработка зрительного сигнала (изображения) в нормальном режиме. На втором этапе ставится задача: за

*Таламус – сложное полифункциональное образование, включающее релейные ядра, где переключается афферентация от органов чувств в соответствующие области коры больших полушарий. 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 колленчатое тело, имеющее прямые связи с затылочными (зрительными) проекционными областями коры больших полушарий.

счет изменения параметров модели получить режим самовозбуждения в виде синхронных колебаний в коре, которые сопоставимы по характеристикам с генерализованной эпилептиформной активностью в реальном мозге.

Верификация биологической правдоподобности модели осуществляется на основе функционального соответствия реакции модельной таламо-кортикальной системы на внешний сигнал (при соответствующих параметрах модели) и реакции реальной живой системы на сенсорный сигнал, зарегистрированные в экспериментах (нейрофизиологические данные, сигналы ЭЭГ и т.п.).

Модель

В нормальных условиях функционирования в системе происходит следующее: в модельную систему приходит внешний сигнал на отделы таламуса модельных модулей; через таламус внешний сигнал поступает в различные ансамбли пирамидальных клеток коры. В работах Шевелева [8] 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. Происходит следующая последовательность: внешний сигнал активирует специфические (сенсорные, или релейные) ядра таламуса (Th, переменная U_1); по таламо-кортикальному пути возбуждение поступает на ансамбль пирамид коры (переменная U_2); пирамиды коры связаны с тормозными интернейронами (переменная U_3); сенсорные, или релейные, ядра таламуса (Th, U_1) и кора (U_2) активируют ретикулярные ядра таламуса (nRT). Неспецифические ядра nRT (переменная U_4) оказывают тормозное влияние на релейные ядра таламуса (U_1), сигнал больше не поступает на кору и деактивируется ядрами nRT. Затем процесс повторяется. В конце каждого активного периода таламические ядра, поддерживающие активность глубоких пирамид в кортикальной области, сильно тормозятся неспецифическими ядрами nRT и приостанавливают активность – это окончание колебаний. Ретикулярное ядро таламуса является воротами для сенсорной информации, поступающей в кору [6]. Оно не имеет прямого выхода на кору. Вместе с тем оно получает входы от коры и от всех других ядер таламуса. При этом его собственный выход может выборочно тормозить или не тормозить те или другие специфические ядра таламуса. Это единственное ядро, которое не имеет своих проекций в коре, и единственное ядро с тормозным выходом, по-видимому, выполняющее функцию внутриталамического регулятора (пейсмекера) [9]. Тормозное влияние ретикулярных ядер таламуса на ансамбли коры и другие ядра таламуса, в том числе и релейное ядро, 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-кортикальной системы на нейронных ансамблях коры формируется прерывистое, стробированное, представление исходного сигнала.

Исходя из того, что отделы в таламусе и зрительной коре имеют слоистую структуру и ретинотопическая организация характерна для всей структуры зрительной системы, заключаем, что отделы мозга, входящие в таламо-кортикальный цикл, могут быть смоделированы в виде двумерных плоских слоев, состоящих из однотипных пороговых элементов. Модели слоев из нейроноподобных элементов опи-

саны во многих работах авторов (см., например, [3–5,10–18]). Сначала это были модели плоского слоя [10–12], затем модели нескольких связанных между собой слоев [10–18].

В данной статье приведены результаты расчетов однослойной однородной распределенной нейроноподобной системы, состоящей из однотипных, связанных между собой, активных пороговых элементов, взаимодействующих через возбуждающие и тормозные связи. В распределенной модели после усреднения по пространству в точке с координатами $\vec{r} = (x, y)$ находится активный элемент, содержащий большое количество «реальных» нейронов. На основе работ [10,11] по моделированию активности в плоском двумерном слое была построена приведенная ниже система балансных интегро-дифференциальных уравнений относительно переменной U_i . Подробно условия вывода модельных уравнений описаны в предыдущих статьях (например, [3,10,16–18]). Настоящая модель является логическим продолжением этого цикла работ по моделированию процессов в обрабатывающих информацию отделах мозга.

Для модуля j переменная $U_i(x, y, t)$ представляет собой распределение возбуждения в двумерной нейроноподобной системе по пространству и во времени и имеет смысл относительного количества зажженных волокон в малом объеме в окрестности (x, y) в момент времени t (другими словами говоря, это проекция распространяющегося по нервным путям возбуждения от соответствующего рецептивного поля, активированного внешним стимулом).

$$\begin{aligned} \frac{\partial U_1^j}{\partial t} &= -\frac{U_1^j}{\tau_1^j} + k_1^j F_1 \left[-T_1^j + k_{ex}^j U_{ex}^j + k_{12}^j U_2^j + k_{14}^j \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{14}^j(\vec{\xi}) U_4^j(\vec{r} - \vec{\xi}, t) d\vec{\xi} \right], \\ \frac{\partial U_2^j}{\partial t} &= -\frac{U_2^j}{\tau_2^j} + k_2^j F_2 \left[-T_2^j + k_{21}^j U_1^j - k_{23}^j U_3^j + k_{22}^j \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_{22}^j(\vec{\xi}) U_2^j(\vec{r} - \vec{\xi}, t) d\vec{\xi} + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{i \neq j} \gamma_i^j \int_{-\infty}^{\infty} U_2^i d\vec{r} \right], \\ \frac{\partial U_3^j}{\partial t} &= -\frac{U_3^j}{\tau_3^j} + k_3^j F_3 \left[-T_3^j + k_{32}^j U_2^j \right], \\ \frac{\partial U_4^j}{\partial t} &= -\frac{U_4^j}{\tau_4^j} + k_4^j F_4 \left[-T_4^j + k_{41}^j U_1^j + k_{42}^j U_2^j \right]. \end{aligned}$$

Здесь величина $U_i(x, y, t)$ пропорциональна числу импульсов, генерируемых нейронами, которые в распределенной модели описывает один активный элемент, расположенный в точке с координатами $\vec{r} = (x, y)$; F_i – нелинейная пороговая функция активации типа конечного скачка (например сигмоидальная функция); T_i – порог активации (параметр, связанный с внутрикорковым торможением); τ_i – характерное время затухания начального возмущения при $F_i = 0$; k_i – плотность активированных нейронов; k_{ex} – сила влияния входного сигнала; k_{ij} – сила влияния j -го участка на i -й; U_{ex} – начальное возбуждение ансамбля нейронов в слое, являющееся проекцией доставленного по нервным путям возбуждения от соответствующего рецептивного поля сенсоров, активированного внешним стимулом; γ_i^j – параметр связи ансамблей коры; Φ_{ij} – функция пространственной связи между нейроноподобными элементами ансамблей или внутри одного ансамбля. Вид функции определяет настройку данного нейронного модуля на операцию по выделению определенного признака внешнего стимула [15–17]. Для выделения объектов заданного размера

используется функция пространственной связи типа латерального торможения (с положительным центром и отрицательными флангами). Для расчетов использовались следующие формулы:

$$\Phi(x, y) = (1 - ar^2) \exp(-br^2)$$

– функция пространственной связи, где

$$r_x = x \cos \varphi + y \sin \varphi, \quad r_y = -x \sin \varphi + y \cos \varphi.$$

Все переменные осреднены и безразмерны и изменяются от 0 до 1.

Модель программно реализована в среде MATLAB 7.7.0 и является усовершенствованной и исправленной версией более ранней модели [5]. Дискретные аналоги уравнений строятся по явной разностной схеме и позволяют вычислить состояние всех переменных $U_i(x, y, t)$ на $(n + 1)$ временном шаге по соответствующему значению функции на n шаге. Шаг дискретизации по времени 0.0005, а шаг вывода результатов расчетов равен 0.5.

Результаты

Была проведена серия расчетов для выяснения зависимости периода колебаний от амплитуды внешнего сигнала. Результат, представленный на рис. 3, подтверждает нейрофизиологические данные и ранее проведенные расчеты [19].

Адекватность выбранной модели подтверждается результатами сопоставления качественного вида динамики получаемых решений с процессами, зарегистрированными в экспериментах: в нормальном режиме обработки сигнала происходит выделение объектов заданного размера, интегральная активность во времени – низкочастотная и низкоамплитудная; в режиме самовозбуждения признаки не выделяются, интегральная активность во времени – высокочастотная с большой амплитудой [18].

Как уже было сказано, модельная система объединяет в себе четыре однотипных модуля, которые связаны между собой. Все параметры этих модулей выбираются одинаковыми за исключением функций связи и входного сигнала.

$$U_{ex}^j = U_0 + \delta U \sin \left(\frac{2\pi t}{T_{ex}} + \frac{\pi(j-1)}{2} \right), \quad (1)$$

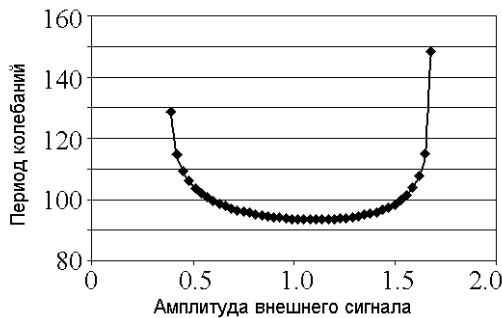


Рис. 3. Зависимость периода колебаний от амплитуды внешнего сигнала

где U_0 – внешний постоянный сигнал; δU – вариация входного сигнала; T_{ex} – период подачи внешнего сигнала на таламус. Входной сигнал меняется во времени, и на каждый из модулей он подается с разной фазой.

В результате расчетов получаем наборы изображений для каждой из четырех переменных в каждом модуле. Это изменение сигнала в виде двумерной картинки во времени. Можно анализировать этот двумерный поток как процесс выделения признаков из исходного изображения (рис. 4).

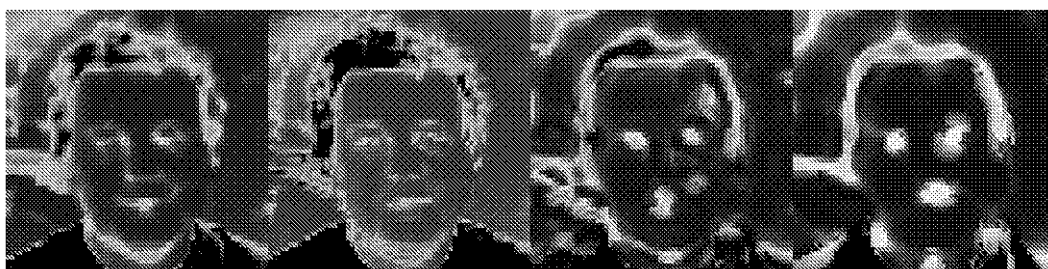


Рис. 4. Выделение объектов заданного размера из исходного изображения в нормальном режиме для переменной, соответствующей пирамидам коры

Следующим шагом работы был анализ зависимости интегральной (суммарной) активности нейронных ансамблей четырех модулей коры от времени – одномерный сигнал, аналог электроэнцефалограммы, снятой с участка коры. Интегральная активность нейронных ансамблей с четырех модулей коры (кортикальных колонок) показывает, как меняется во времени общий уровень возбуждения в коре. Построены графики зависимости интегральной активности от времени. В численном эксперименте для одного модуля – это нормированная на площадь суммарная яркость точек на изображении, соответствующем переменной коры, изменяющаяся во времени в процессе выделения из внешнего сигнала различных признаков (объектов заданного размера, линий заданного направления и т.п.). Интегральная активность нейронных ансамблей учитывает эти характеристики с четырех модулей коры.

В модельных расчетах были определены нормальные условия кодирования изображения (сенсорного сигнала) [12–14, 5]. В данной работе найдены условия возникновения режимов самовозбуждения в модели «зрительная кора – интернейроны коры – таламус – ретикулярные ядра таламуса».

При моделировании переменной активности нейронных ансамблей коры (рис. 5) получены следующие результаты. Если ансамбли коры связаны слабо, то есть $\gamma_1^2 = \gamma_1^4 = \gamma_2^3 = \gamma_3^4 = 0.04$, $\gamma_1^3 = \gamma_2^4 = 0.01$ (рис. 5, а), то колебания рассинхронизованы. Из исходного сигнала в виде полутонного изображения выделяются признаки – в настоящих расчетах это объекты заданного размера (см. рис. 4). При увеличении силы связи, то есть при $\gamma_1^2 = \gamma_1^4 = \gamma_2^3 = \gamma_3^4 = 0.4$, $\gamma_1^3 = \gamma_2^4 = 0.1$ (рис. 5, б), возникает синхронизация колебаний. Это аналог эпилептиформной активности (амплитуда и частота выросли). Порог возбуждения равен 1. При увеличении порога возбуждения ансамблей (при том же параметре связи) от 1 до 1.05, система остается индифферентной к входному сигналу – амплитуда колебаний до 0.05 (рис. 5, в), а при сильной связи в ансамблях коры возникают синхронные колебания высокой амплитуды, но с меньшей частотой (рис. 5, г). Увеличение параметров связи и порога возбуждения ансамблей коры приводят к синхронизации колебаний и увеличению амплитуды сигнала.

В соответствии с идеологией исследования качественной характеристикой эпилептического режима был выбран процесс перехода к режиму синхронизации и увеличения интегральной активности нейронов в коре. При этом в данном модельном исследовании было важно отношение частоты в режиме синхронизации к частоте в нормальном режиме. В расчетах, результаты которых приведены на рис. 5, а, б, оно составляет примерно 1.12. Следует подчеркнуть, что модель показывает лишь возможные варианты процесса.

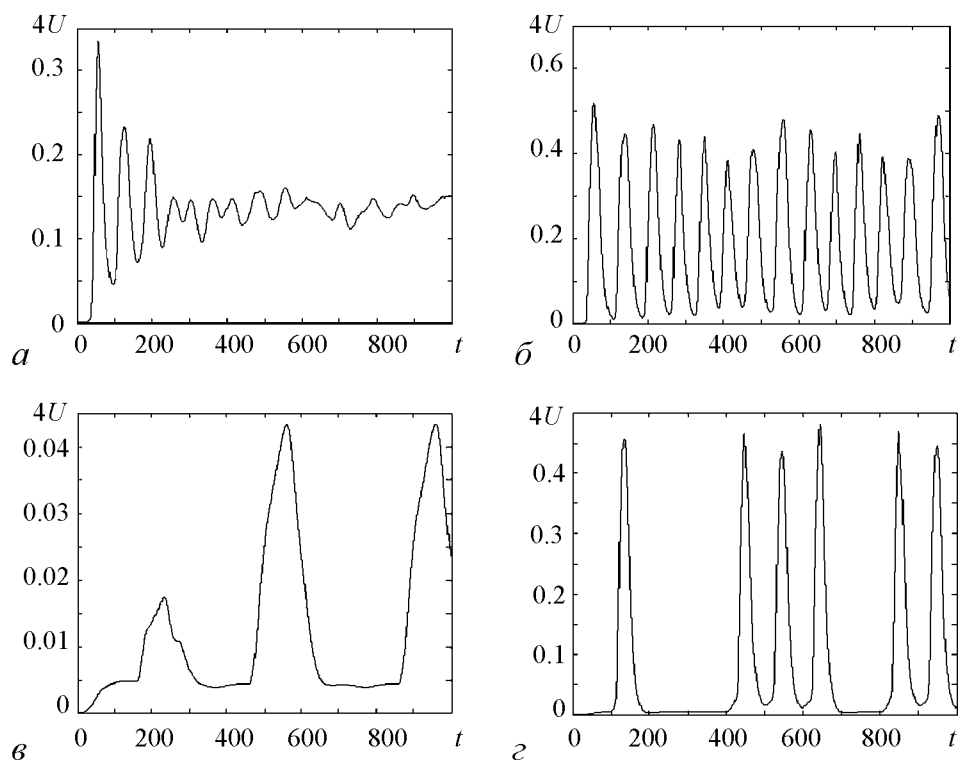


Рис. 5. Примеры суммарной временной активности коры

Расчеты были проведены при постоянных параметрах (порог возбуждения нейронных ансамблей коры, сила связи и др.) Но во взаимодействующих ансамблях нейронов пороги действительно меняются так, что приводят к сильным изменениям выполняемых ими функциональных операций. Внутриклеточные пороги могут изменяться, например, под действием нейромедиаторов со стороны других, управляющих, нейронных ансамблей, это обуславливает изменение порогов срабатывания и в модельной распределенной системе.

При иерархическом устройстве система контроля функционирования подсистем сама «выбирает» из многих режимов тот, который предполагается оптимальным.

В настоящее время моделирование нацелено на воспроизведение процесса возникновения и прекращения синхронных колебаний и сопоставления параметров модели с реальными параметрами биологической таламо-кортикальной системы. Все параметры модельной системы задаются в относительных единицах.

На рис. 6 представлен один из расчетных экспериментов для такой системы. Построены графики зависимости от времени интегральной активности нейронных ансамблей коры. На рис. 6, *a–г* приведена зависимость активности четырех нейронных ансамблей коры из различных модулей от времени и дифференцированная по времени суммарная активность в этих модулях (рис. 6, *д*), которая получается в процессе пространственно-временной обработки изображения, подаваемого в качестве входного сигнала на таламус.

В этом эксперименте порог возбуждения ритмически меняется, меняется сила связи между нейронными ансамблями коры, поэтому возникает режим перехода от

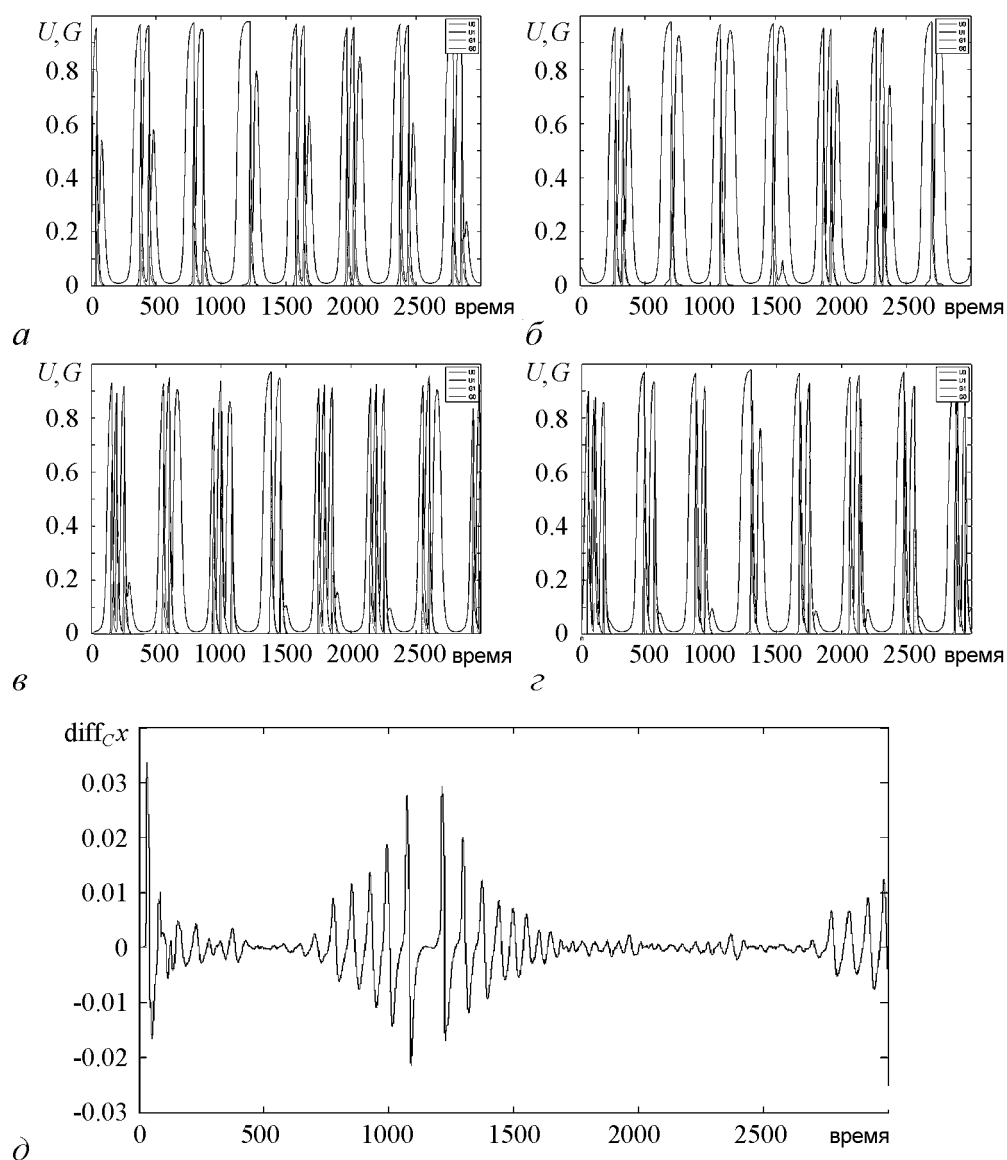


Рис. 6. *a–г* – зависимость интегральной активности четырех нейронных ансамблей коры от времени; *д* – дифференцированная по времени суммарная активность четырех нейронных ансамблей коры

несинхронных колебаний в ансамблях к синхронным колебаниям во всей системе (аналог генерализованной эпилепсии), что хорошо видно на графике дифференцированной по времени суммарной активности нейронных ансамблей, которая воспроизводит (в относительных единицах) частотно-временную структуру короткого пикового разряда (см. рис. 2). Сигналы реальной ЭЭГ формируются электрическим полем сложной формы (как минимум, диполем [8]) и определяются пространственной геометрией расположения различных нейронных ансамблей, вовлеченных в анализируемый процесс. В настоящей статье берется упрощенный вариант регистрируемого поля в виде дифференциальной зависимости изменений суммарной активности во времени (см. рис. 6, *д*).

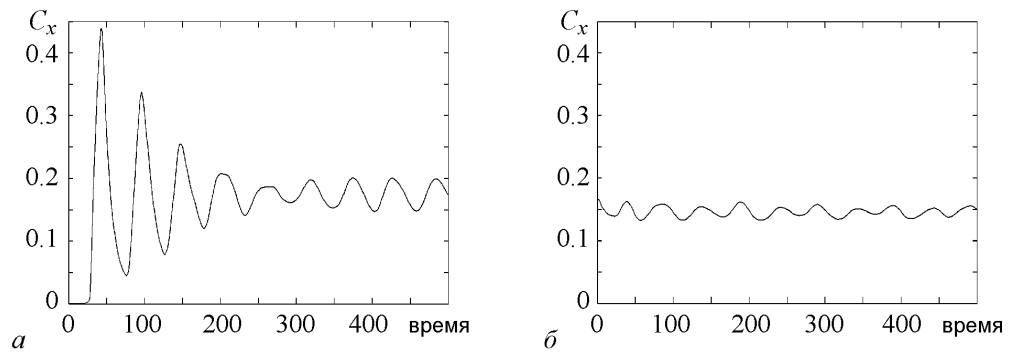


Рис. 7. *а* – суммарная активность в системе с нулевыми начальными условиями, *б* – ненулевые начальные условия

На рис. 5, *а*, рис. 6, *д* и рис. 7, *а* суммарной активности хорошо видно высокое возбуждение в первые моменты работы системы. Это связано с тем, что начальные условия в моделируемой системе были нулевые, то есть все 4 модуля находились в одинаковом состоянии. Так как времена затухания сигнала и пороги возбуждения во всех модулях были равные, а разными были только функции связи, то динамика модулей в первые моменты была достаточно синхронной. Чтобы уйти от начальной синхронизации, были взяты в качестве начальных условий распределения активности системы в момент времени, когда она рассинхронизована. Полученный результат представлен на рис. 7, *б*.

На рассмотренной в данной работе модельной системе предполагается проведение дальнейших исследований по поиску различных типов ритмической активности в таламо-кортикальных модулях и нахождение тех значений параметров, при которых возможно их существование. Важно также изучение переходных процессов, позволяющее переключать состояние системы из одного режима в другой.

Работа поддержана грантами Программ Президиума РАН «Фундаментальные науки в медицине», «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики» и грантом РФФИ № 11-07-12027-офи-м-2011.

Библиографический список

1. Hecht-Nielsen R. Replicator neural networks for universal optimal source coding // Science. 29 September 1995. Vol. 269. 1960.
2. Hecht-Nielsen R. A theory of the cerebral cortex // Proceedings of the 6th International Conference on Molecular Electronics and Biocomputing. Future Electronic Devices Association of Japan. Okinawa, 28–30 November 1995.
3. Яхно В.Г., Нуйдель И.В., Иванов А.Е. Модельные нейроноподобные системы. Примеры динамических процессов // Нелинейные волны – 2004 / Отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Ниж. Новгород: ИПФ РАН, 2005. С. 362.
4. Sokolov M.E., Tel'nykh A.A., Koval'chuk A.V., Bellyustin N.S., Nuidel' I.V., and Yakhno V.G. Face recognition using «lateral inhibition» function features // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2009. Vol. 18, № 1. P. 1.

5. *Coenen A.M.L., van Luijtelaar E.L.J.M., Kuznetsova G.D., Ivanov A.E., Nuidel I.V., Khurlapov P.G., and Yakhno V.G.* Modeling of transition regimes between normal and pathological transformation of sensor signals in brain // Proceedings of Nijmegen Institute for Cognition and Information, 2004. P. 331.
6. *Coulter D.A.* Thalamocortical Anatomy and Physiology, Epilepsy: A Comprehensive Textbook // J. Engel (ed.), Jr. and T.A. Pedley. Liippincott Raven Publisher: Philadelphia, 1997. 341 p.
7. *Кузнецова Г.Д., Габова А.В., Соколов М.Е.* Исследование механизмов поддержания и окончания статуса абсансной эпилепсии // Труды конференции. Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011. Нижний Новгород, 2011. С. 107.
8. *Шевелев И.А.* Волновые процессы в зрительной коре мозга // Природа. 2001. № 12. http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/12_01/ALPHA.HTM
9. *Данилова Н.Н.* Психофизиология. Учебник для вузов. М.: АСПЕНТ ПРЕСС, 2000.
10. *Кудряшов А.В., Яхно В.Г.* Распространение областей повышенной импульсной активности в нейронной сети // Динамика биологических систем. 1978. Вып. 2. С. 45.
11. *Masterov A.V., Tolkov V.N., Yakhno V.G.* Spatio-temporal structures in opto-electronic devices // Nonlinear Waves 1. Dynamics and Evolution / Eds. A.V. Gaponov-Grekhov, M.I. Rabinovich, J. Engelbrecht. Springer-Verlag, 1989. P. 168.
12. *Bellustin N.S., Kuznetsov S.O., Nuidel I.V., Yakhno V.G.* Neural networks with close nonlocal coupling for analysing composite image // Neurocomputing. 1991. Vol. 3. P. 231.
13. *Нуйдель И.В., Яхно В.Г.* Моделирование процессов преобразования сенсорной информации // Нейрокомпьютеры как основа мыслящей ЭВМ. 1993. С. 207.
14. *Yakhno V.G., Bellustin N.S., Krasil'nikova I.G., Kuznetsov S.O., Nuidel I.V., Panfilov A.I., Perminov A.O., Shadrin A.V., Shevyrev A.A.* Research decision-making system operating with composite image fragments using neuron-like algorithm // Radiophysics. 1994. Vol. 37, № 8. P. 961.
15. *Кузнецова Г.Д., Пелиновский Д.Е., Яхно В.Г.* Математические модели динамики волн распространяющейся депрессии в коре головного мозга // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1994. Т. 2, № 3–4. С. 86.
16. *Yakhno V.G.* Basic models of hierarchy neuron-like systems and ways to analysis some of their complex reactions // Optical Memory & Neural Network. 1995. Vol. 4, № 2. P. 141.
17. *Яхно В.Г.* Процессы самоорганизации в распределенных нейроноподобных системах: Примеры возможных применений // Нейроинформатика 2001. Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2001. С. 103.
18. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // Нелинейные волны–2002. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003. С. 90.

19. Спицын И.Г., Нуйдель И.В., Яхно В.Г. Моделирование таламо-кортикальных связей в сенсорных системах // Научная сессия НИЯУ МИФИ–2004. Сборник научных трудов VI Всероссийской научно-технической конференции «Нейроинформатика–2004» / М.: МИФИ. 2004. Часть 1. С. 145.

*Институт прикладной
физики РАН, Н. Новгород
Институт высшей нервной деятель-
ности и нейрофизиологии РАН, Москва*

Поступила в редакцию 14.07.2011

SIMULATOR OF THE DYNAMIC PROCESSES OF SENSOR SIGNAL PROCESSING IN TALAMO-CORTICAL NETWORKS

M.E. Sokolov, G.D. Kuznetsova, I.V. Nujdel, V.G. Yakhno

Now models (simulators) of neural networks are actively developed. Their architecture and design are based on features of structure and principles of work of real neurons and neurobiological systems. Working out neurolike models based on the data about architecture of connections in a brain, it is aimed at finding-out of principles of work of its neural structures.

In experimental researches it is revealed that interconnected neuronal modules such as cortex, reticular modules of thalamus, specific thalamus play the important role in processes of information processing. Therefore it is very important to find out, how the entrance signal in these structures of a brain will be transformed, and what internal processes can limit and completely break their teamwork. One of variants of such processes is the epilepsy.

At this paper results of last calculations on functional model of interaction neurolike modules in the course of information processing in thalamocortical system are presented. The model is realized in the environment of MATLAB 7.7.0 and this is the advanced and corrected version of earlier model.

Keywords: Time-frequency analysis of EEG, epileptic activity, sleep spindles, rhythmic activity of brain, oscillation pattern of EEG.



Соколов Максим Евгеньевич – родился в Горьком (1984), окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (2008). После окончания ННГУ работает в ИПФ РАН младшим научным сотрудником. Опубликовал 2 статьи, также имеет 17 публикаций в тезисах докладов и трудах конференций.

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: sokolov.maxx@gmail.com



Кузнецова Галина Дмитриевна – профессор, доктор биологических наук, главный научный сотрудник Института Высшей нервной деятельности и нейрофизиологии, лаборатория общей физиологии временных связей.

117485 Москва, ул. Бутлерова, д. 5А
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
E-mail: gdkuznetsova@yandex.ru



Нуйдель Ирина Владимировна – родилась в 1966 году. Закончила радиофизический факультет Горьковского государственного университета по специальности «Радиофизика и электроника» (1988). С 1990 года работает в ИПФ РАН. Имеет ученую степень кандидата наук (1998) и стаж работы в должности старшего научного сотрудника 7 лет (с 01.06.2004 по настоящее время). Область научных интересов: нелинейная динамика, исследование структур коллективной активности в однородных распределенных нейроноподобных системах, обработка изображений. Автор более 50 работ.

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: nuidel@awp.nnov.ru



Яхно Владимир Григорьевич – родился в 1947 году, доктор физико-математических наук, заведует лабораторией в Институте прикладной физики РАН (Нижний Новгород). Научные интересы связаны с исследованием процессов самоорганизации в распределенных неравновесных системах и применением автоволновых представлений для моделирования процессов обработки сенсорных сигналов, развития компьютерных алгоритмов кодирования сложных изображений (разработка биометрических систем), рассмотрением характерных процессов в модельных системах, имитирующих функционирование живых систем. Имеет более 200 научных публикаций (в том числе 2 монографии и 10 патентов).

603950 Н. Новгород, ГСП-120, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: yakhno@appl.sci-nnov.ru