

## Функция Ляпунова как инструмент исследования когнитивных и регуляторных процессов организма

А. Т. Терехин<sup>1,2,a</sup>, Е. В. Будилова<sup>1</sup>, М. П. Карпенко<sup>2</sup>,  
Л. М. Качалова<sup>2</sup>, Е. В. Чмыхова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,  
биологический факультет,

119991, ГСП-1, г. Москва, Ленинские горы, МГУ, д. 1, стр. 12

<sup>2</sup>Современная гуманитарная академия,

109029, г. Москва, ул. Нижегородская, д. 32

E-mail: <sup>a</sup>terekhin\_a@mail.ru

Получено 18 мая 2009 г.,  
после доработки 15 июня 2009 г.

Когнитивные и регуляторные процессы в организме обеспечиваются функционированием нескольких различных сетевых систем — нервной, эндокринной, иммунной, генной, которые, однако, тесно связаны между собой и образуют единую нейрогеногуморальную когнитивно-регуляторную динамическую сеть организма. Дается обзор работ, показывающих, что с этой сетью можно связать соответствующую ей функцию Ляпунова (функцию энергии, потенциальную функцию), анализ которой, в силу ее геометрической наглядности, позволяет легко обнаружить ряд общих закономерностей, касающихся когнитивной и регуляторной деятельности организма.

Ключевые слова: функция Ляпунова, когнитивная деятельность, механизмы регуляции

### Lyapunov function as a tool for the study of cognitive and regulatory processes in organism

A. T. Terekhin<sup>1,2</sup>, E. V. Budilova<sup>1</sup>, M. P. Karpenko<sup>2</sup>, L. M. Kachalova<sup>2</sup>, E. V. Chmyhova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Moscow State University, Biological Faculty, MSU, 1, building 12, GSP-1, Leninskiye Gory, Moscow, 119991, Russia

<sup>2</sup>Modern University of the Humanities, Nizhegorodskaya str. 32, Moscow, 109029, Russia

**Abstract.** — Cognitive and regulatory processes in organism are ensured by the functioning of several different network systems — neural, endocrine, immune, and gene ones. These systems are, however, closely related and form a single integrated neurogenohumoral cognitive-regulatory dynamic system of organism. A review of publications is given which shows that it is possible to associate with this dynamic system a corresponding Lyapunov function (energy function, potential function) and that analyzing this function allows, due to its geometrical insight, to easily discover a set of general properties of cognitive and regulatory functioning of organism.

Key words: Lyapunov function, cognitive functioning, regulatory mechanisms

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2009, vol. 1, no. 4, pp. 449–456 (Russian).

Можно заметить, что многие системы организма — генетическая, иммунная, эндокринная — имеют сетевую организацию [18, 20]. Наиболее явно сетевая структура проявляется в строении мозга [12]. Говоря о сетевой организации некоторой системы, мы подразумеваем, что она состоит из большого числа элементов с относительно плотной сетью связей между ними. Методологическая полезность выделения такого класса систем диктуется требованиями эффективности анализа этих систем с целью прогнозирования их поведения и управления ими. Традиционный подход к прогнозированию поведения системы в ответ на некоторое начальное воздействие основан на отслеживании результатов последовательного воздействия одних частей системы на другие. Такой последовательный подход целесообразно использовать, если удастся описать поведение системы однонаправленным взаимодействием относительно небольшого числа частей. Однако в случае, когда число взаимодействий велико и цепь причин и следствий проследить практически невозможно, эта методика не работает. Возникают чисто сетевые свойства, которые не удастся эффективно описать на логико-алгоритмическом уровне.

Адекватным инструментом анализа сетей может служить теория динамических систем, прежде всего, такие ее понятия, как пространство состояний, фазовый портрет, аттракторы и бассейны их притяжения. Таким образом, выяснение того, что некоторая система имеет сетевую организацию, практически означает, что целесообразно в ее исследовании перейти от логико-алгоритмического языка к геометрическому языку теории динамических систем. Наиболее наглядное представление о поведении динамической системы дает функция Ляпунова. Поэтому в некоторых случаях может даже иметь смысл упростить математическое описание реальной системы с тем, чтобы получить возможность построить для нее функцию Ляпунова, называемую также функцией энергии и потенциальной функцией. Примером такого упрощения служит сеть Хопфилда [13, 14], рассматриваемая в качестве модели, описывающей когнитивную деятельность мозга, — в ней, в частности, предполагается симметричность межнейронных связей, которая отсутствует в реальном мозге.

Ниже мы кратко опишем биологические факты, позволяющие утверждать, что когнитивные и регуляторные процессы в организме обеспечиваются функционированием единой нейрогеногуморальной когнитивно-регуляторной динамической сети, объединяющей нервную, эндокринную, иммунную и генную системы, после чего приведем примеры эффективного, на наш взгляд, применения анализа, основанного на использовании функции Ляпунова, для описания свойств этой сети или ее частей.

## **Когнитивно-регуляторная сеть организма**

Сетевая структура наиболее явно выражена в организации нервной системы организма. На это определенно указывают известные данные о ее анатомии и физиологии. Основные элементы нервной системы — нейроны, которые могут находиться в возбужденном или невозбужденном состоянии, соединены множественными нитевидными отростками — аксонами и дендритами, способными передавать электрическое возбуждение в направлении от аксона одного нейрона к дендриту другого. Участок соприкосновения аксона с дендритом, называемый синапсом, играет роль модификатора интенсивности (веса) проходящего через него сигнала. Пропускные характеристики каждого конкретного синапса могут формироваться как под генетическим контролем, так и в зависимости от информации, поступающей из окружающей среды.

Имеются достаточно убедительные аргументы в пользу того, что не только нервная, но и эндокринная система должна рассматриваться как сеть. Одним из таких аргументов является многофункциональность действия большинства гормонов [1]. Многие особенности физиологических и биохимических механизмов функционирования эндокринной системы также говорят в пользу ее сетевой организации. Эндокринная система состоит из клеток нескольких типов, продуцирующих гормоны разного типа. В основном клетки эндокринной системы сконцентрированы в желе-

зах внутренней секреции, однако значительная их часть содержится и в других органах, например в мозге, желудочно-кишечном тракте. На внешней поверхности мембраны любой эндокринной клетки находятся специфичные только для клеток ее типа рецепторы, реакция которых на сигнальные молекулы определенной конфигурации изменяет интенсивность синтеза и выделения гормонов этой клеткой. В частности, в роли таких сигнальных молекул могут выступать гормоны, производимые эндокринными клетками других типов, что и обеспечивает сетевое взаимодействие между разными типами эндокринных клеток. В [11] нами была сделана попытка на основании литературных данных о взаимном стимулирующем и ингибирующем влиянии друг на друга 30 различных гормонов построить сетевую модель их взаимодействия и найти ее аттракторы.

Представление об иммунной системе как о динамической сети было введено в 1974 г. Джерном [15]. Элементами иммунной сети являются антитела разного типа — идиотипы. Как известно, продуцирование антитела любого типа резко возрастает, если в крови появляются его антигены — молекулы со структурой, комплементарной к рецепторной части антитела. Если антиген — чуждый организму белок, то его носитель подвергается атаке. Однако антигенами по отношению к антителам данного типа А могут быть также и антитела любого другого типа В и, наоборот, сами антитела типа А могут быть антигенами для антител других типов. Антитела типа А, распознавшие антитела типа В в качестве антигенов, увеличивают свою численность и уменьшают численность антител типа В. Однако рост численности антител типа А может подавляться антителами третьего типа С, распознавшими их в качестве антигенов, а рост численности антител типа В может стимулироваться в случае обнаружения ими в качестве антигенов антител еще одного типа D и т. д. Таким образом, антитела различных типов, находясь в постоянном взаимодействии друг с другом, образуют динамическую сеть, аналогичную сети нейронов или сети гормонов.

Генные сети были предложены С. Коффмэном [16] в качестве модели генетической регуляции процессов морфогенеза и клеточной дифференциации. Эта модель основана на предположении, что любой ген через продуцируемые под его контролем продукты может, в принципе, влиять на экспрессию любого другого гена. В результате экспрессия любого гена в каждый момент времени зависит от паттерна экспрессии всех остальных генов. Степень и направление влияния одного гена на другой определяется особенностями химического строения белка, кодируемого первым геном, и участка ДНК, содержащего второй. Предполагается, что адекватное выживанию организма формирование именно этих особенностей строения ДНК и белков и было основным результатом эволюционного отбора.

Иммунная и эндокринная сети — это гуморальные (жидкостные) сети. Однако они не просто сосуществуют в общей жидкой среде организма. Имеются многочисленные исследования, подтверждающие их активное взаимодействие — некоторые гормоны влияют на работу иммунной сети, а некоторые антитела воспринимаются эндокринной системой как гормоны [21]. Поэтому есть полные основания говорить об общей «иммунно-эндокринной» сети. Можно пойти еще дальше и рассматривать сеть, образуемую всеми типами информационных молекул, циркулирующих в жидкостях организма и взаимно регулирующих концентрации друг друга. Такую сеть естественно было бы назвать «гуморальной регуляторной сетью» организма.

Введя понятие гуморальных сетей и начав анализировать их работу, мы сразу же обнаруживаем, что концентрация значительной части информационных молекул непосредственно регулируется генетической и нервной системами. Поэтому методологически более правильно рассматривать гуморальную сеть не отдельно, а в комплексе с нейронной и генной сетями. Действительно, генная сеть является первичным регулятором синтеза белков, а через посредство ферментов — в конечном счете, и всех химических соединений в организме. Нервная система, в свою очередь, несет основную нагрузку по восприятию состояния внешней и внутренней среды и выработке адекватных реакций, учитывающих опыт, приобретенный организмом в течение жизни. Полученная в результате объединения трех сетей единая нейрогеногуморальная сеть организма обладает достаточной общностью и замкнутостью, чтобы рассматриваться в качестве интегральной модели когнитивной деятельности и физиологической регуляции организма.

## Сеть Хопфилда

Сеть Хопфилда [13] характеризуется тем, что все ее элементы (нейроны) связаны со всеми остальными и есть только два ограничения на веса синаптических связей: веса прямых и обратных связей равны между собой, а вес связи нейрона с самим собой равен нулю (условие симметричности связей не является биологически мотивированным, а служит упрощающим допущением, позволяющим построить для сети функцию Ляпунова). Состояние каждого нейрона  $i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ , в момент времени  $t$  задается переменной состояния  $u_i(t)$ , принимающей значение  $-1$  или  $1$ . Динамика сети определяется правилами изменения состояний ее нейронов и весов  $w_{ij}(t)$  синаптических связей, соединяющих нейроны  $i$  и  $j$ . Если веса  $w_{ij}(t)$  и состояния  $u_i(t)$  сети в момент времени  $t$  заданы, то в следующий момент  $t + 1$  состояние нейрона  $i$  изменится в соответствии с правилом

$$u_i(t+1) = \operatorname{sgn} \left( \sum_{j=1}^n w_{ij}(t) u_j(t) + I_i(t) \right),$$

где  $I_i(t)$  — внешний входной сигнал, а  $\operatorname{sgn}$  — функция, равная  $-1$  для отрицательных значений аргумента и  $1$  — для положительных, т. е. просто пороговая функция (значение в нуле можно определить произвольно). Что касается синаптических весов, то для всех  $j \neq i$  они изменяются в соответствии с правилом Хебба

$$w_{ij}(t+1) = w_{ij}(t) + u_i(t)u_j(t),$$

т. е. вес увеличится на единицу, если нейроны  $i$  и  $j$  находятся в одинаковых состояниях (оба равны  $-1$  или оба равны  $1$ ), и уменьшится на единицу, если — в разных (один в состоянии  $-1$ , а другой — в состоянии  $1$ ).

Поведение сети Хопфилда очень удобно интерпретировать в терминах функции Ляпунова (функции энергии), вид которой в момент  $t$  определяется значениями весов связей и которая задается формулой

$$E(u_1, \dots, u_n, t) = -0,5 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}(t) u_i(t) u_j(t).$$

Значение этой функции в момент  $t$  зависит от совокупности состояний нейронов  $u_1(t), \dots, u_n(t)$  в этот момент, т. е. от состояния сети, которое можно наглядно представлять в виде точки в  $n$ -мерном пространстве состояний нейронов.

Можно показать, что изменение состояния сети может происходить только в направлении уменьшения функции энергии. Этот факт позволяет наглядно представлять изменение состояния сети как его движение по поверхности функции энергии, подобно тому как это происходит, например, с помещенным на неровную поверхность шариком, который всегда движется в направлении уменьшения своей потенциальной энергии к ближайшему локальному минимуму — аттрактору. Все пространство состояний распадается на области, образующие так называемые бассейны притяжения аттракторов, и динамика сети, установленной в некоторое начальное состояние, полностью зависит от того, в бассейн притяжения какого из аттракторов она попала [4, 6, 8, 9, 13].

Определенная таким образом сеть обладает рядом интересных свойств с точки зрения ее использования как модели биологических когнитивных процессов. Рассмотрим эти свойства, интерпретируя их в терминах функции Ляпунова. Для наглядности представим, что нейроны обра-

зуют прямоугольную решетку, и мы можем наблюдать их состояния в разные моменты времени. Пусть сначала все синаптические веса сети равны нулю, т. е. ее функция энергии представляет собой «горизонтальную» гиперплоскость  $E(u_1, \dots, u_n, t) = 0$ , а на входы ее нейронов поступает некоторая конфигурация сигналов — образ. В результате нейроны установятся в состояния, соответствующие этому образу, после чего, в соответствии с правилом Хебба, сформируются новые веса сети. Если после этого предъявить сети любое другое сочетание сигналов и разрешить ей свободно эволюционировать во времени, то через небольшое число шагов состояние сети стабилизируется на ранее предъявленном образе. Можно сказать, что сеть его «запомнила»! Что же касается функции энергии, то в точке, соответствующей запомненному образу, при запоминании образуется локальный минимум. Образно можно сказать, что на исходно ровной поверхности появилось «углубление» и вспоминание образа — это «скатывание» состояния сети в это углубление.

Если предъявлять сети другие образы, то предъявление каждого из них внесет свой вклад в изменение синаптических весов и они тоже будут «запомнены» сетью. В том смысле, что если предъявить сети образ, похожий на один из запомненных, то сеть придет в состояние, соответствующее этому запомненному образу, т. е. вспоминание имеет ассоциативный характер — сеть эволюционирует в направлении локального минимума, в бассейн притяжения которого она попала. При достаточно большом числе нейронов каждому локальному минимуму соответствует свой отдельный локальный минимум функции энергии. Однако при запоминании образов (обучении сети) могут образоваться и дополнительные локальные минимумы, соответствующие образам, как бы составленным из частей запоминаемых образов, т. е. своего рода «химеры». Возможность появления таких химер наделяет сеть, в некотором смысле, способностью к «творческой фантазии» и «обобщению».

## Ассоциативное управление состоянием организма

Идея ассоциативного управления состоянием организма [6, 19] состоит в том, что если перевести когнитивно-регуляторную сеть организма в состояние, достаточно близкое к желаемому, то она окажется в бассейне притяжения этого состояния и далее будет приближаться к нему уже самопроизвольно в соответствии со своей внутренней динамикой. В терминах распознавания образов это отвечает ситуации, когда сети предъявляется часть искомого образа, т. е. связанная с ним ассоциация, а сеть динамически восстанавливает полный образ. Предполагается, что желаемое состояние является аттрактором сети, т. е. целевое состояние для нее потенциально устойчиво либо в силу генетических причин, либо в силу особенностей предшествующего индивидуального развития организма. Другим условием успешного применения метода ассоциативного управления являются достаточная обширность бассейна притяжения желаемого состояния и его относительная геометрическая простота. В этом случае даже относительно слабая ассоциация с желаемым состоянием может привести к его достижению.

Одним из потенциально возможных применений принципа ассоциативного управления состоянием организма может быть медицина. Особенность состоит в том, что, следуя современной общенаучной парадигме исследования, официальная научная медицина (в отличие от многих маргинальных медицинских направлений) тяготеет к рационализму. Свидетельством рациональности некоторой методики может быть либо ее соответствие рациональной теории, либо неопровержимые экспериментальные подтверждения. Сетевой подход представляет собой рациональную теорию, которая может объяснить многие кажущиеся непонятными закономерности динамики состояний организма и многие эмпирически найденные (или выведенные из еще нерационализированных теорий) методики лечения (в том числе и из применяемых официальной медициной). Мы даже считаем, что такой подход должен быть базовым для теории медицины. Именно в его терминах могут быть сформулированы и описаны основные понятия и закономерности динамики

изменения состояния организма. Это прежде всего многосвязность функциональных элементов организма, их полифункциональность, распределенность функций между многими элементами. Для понимания того, что такого рода система может обладать целесообразным и подчиняющимся строгим законам поведением, необходимо перейти от анализа связей между ее отдельными элементами к рассмотрению геометрии ее функции Ляпунова (в общем случае — фазового портрета) в пространстве состояний организма. Основное свойство динамической системы — его аттракторный, мультистабильный характер. Нелинейная динамическая сеть — это не примитивный «черный ящик», выдающий в ответ на заданный вход определенный выход. Это — система, эволюционирующая в соответствии со своими сложными внутренними законами, и если и реагирующая на внешние воздействия, то лишь весьма опосредованно, с учетом этих законов. И только уже имея базовое сетевое представление о законах функционирования целого организма и его подсистем, можно, не забывая соотносить частное с целым, исследовать отдельные закономерности функционирования организма и разрабатывать частные методики управления его состоянием. Более детально вопросы ассоциативного управления состоянием организма рассмотрены в [6].

## Воспроизведение и узнавание

Существует резкий контраст между знанием субъекта о том, что некоторая информация содержится в его памяти, и возможностью извлечь эту информацию. Так, в ряде психологических тестов испытуемые после показа нескольких тысяч изображений могли почти безошибочно ответить на вопрос о том, было или нет им ранее показано предъявляемое изображение, тогда как возможности детального воспроизведения были существенно ниже [17].

Нейросетевое моделирование процесса узнавания основано на наблюдении, что функция Ляпунова сети Хопфилда принимает большие значения для запомненных образов по сравнению с вновь предъявляемыми [9]. В [10] показано, что максимальное количество образов, которые могут быть предъявлены сети Хопфилда и затем с ошибкой менее 1 % узнаны как знакомые на основании соответствующего им значения энергии, равно  $0.23 n^2$ , что при больших  $n$  на порядки выше, чем максимальное число образов, которые могут быть запомнены сетью с возможностью последующего полного воспроизведения, —  $0.145 n^2$  [9].

В [10] описывается ряд архитектур нейронных сетей, которые биологически правдоподобно могут произвести вычисления, близкие к требуемым формулой вычисления функции Ляпунова для сети Хопфилда. Мы предложили новую нейросетевую модель узнавания [2, 3], также основанную на использовании функции Ляпунова, но, на наш взгляд, более естественно согласующуюся с вычислениями, осуществляемыми сетью Хопфилда. Мы модифицировали функцию Ляпунова, заменив внутреннюю сумму ее знаком (мы отбросили также несущественный в данном контексте множитель  $-0.5$ ), что, после преобразований, привело к выражению

$$F(u_1, \dots, u_n, t) = \sum_{i=1}^n u_i(t) u_i(t+1).$$

Мы видим, что функция  $F(u_1, \dots, u_n, t)$  — можно назвать ее «знакомостью» (англ. «familiarity») — равна просто скалярному произведению векторов состояний нейронов в два последующих временных шага. Максимальные значения знакомости достигаются в стационарных точках сети, соответствующих запомненным образам, тогда как для новых образов значение знакомости близко к нулю. Можно показать, что емкость памяти предлагаемой сети равна  $0.18 n^2$ , т. е. снижается незначительно по сравнению со значением  $0.23 n^2$ , получаемым при использовании самой функции энергии. Таким образом, квадратичная зависимость числа узнаваемых образов от числа нейронов может быть получена с помощью более простого нейросетевого механизма, что является доводом в пользу того, что такого типа механизм может быть реализован в нейросетевой структуре мозга.

## Возрастные изменения когнитивных свойств мозга

Если в уравнении динамики сети Хопфилда заменить пороговую функцию сигмоидной

$$u_i(t+1) = 2/[1 + \exp(-G \sum w_{ij} u_j(t))] - 1,$$

то ее функция Ляпунова примет вид

$$E(t) = -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n u_i(t) w_{ij}(t) u_j(t) + \frac{1}{G} \sum_{i=1}^n \ln[(1 + u_i(t))^{1+u_i(t)} (1 - u_i(t))^{1-u_i(t)}].$$

Параметр  $G$  определяет крутизну сигмоидной кривой, а поскольку многие анатомические, физиологические и биохимические изменения в организме ведут к ослаблению межнейронных связей, то естественно связать возрастные изменения мозга (а возможно, и всей когнитивно-регуляторной сети организма) с уменьшением параметра  $G$  [5, 8].

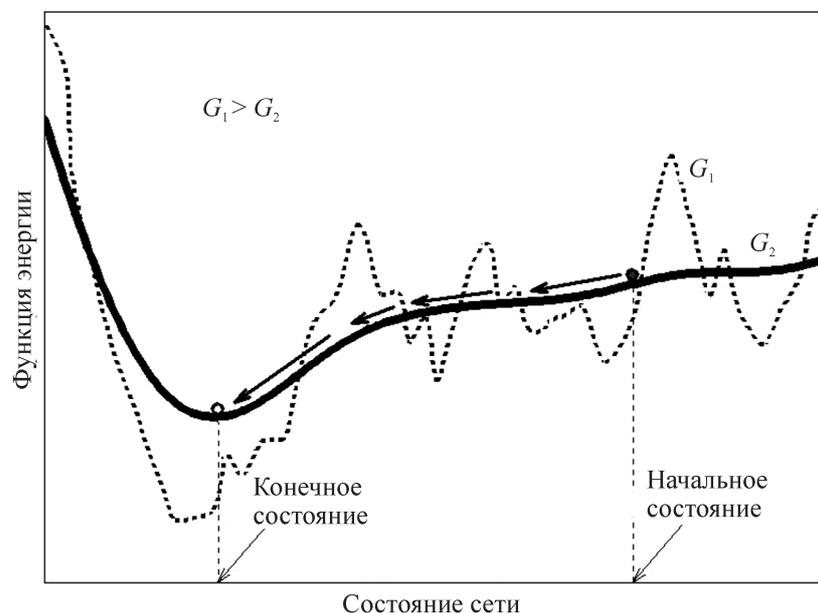


Рис. 1. Возрастное сглаживание функции Ляпунова нейронной сети

В свою очередь, уменьшение  $G$  приводит к сглаживанию рельефа поверхности, задаваемой функцией Ляпунова, и, соответственно, уменьшению числа аттракторов сети (рис. 1). На основании этого нами был сделан вывод о том, что при старении мозга наряду с отрицательными, на первый взгляд, изменениями его когнитивных свойств, такими, например, как ослабление памяти на детали повседневной жизни, у него появляется ценная способность видеть проблемные ситуации с более общей точки зрения, выделять в них главное и, в конечном итоге, находить наиболее эффективные решения, т. е. возникает способность, которую можно рассматривать как составляющую часть мудрости — когнитивного свойства, традиционно ассоциирующегося с пожилым возрастом.

## Список литературы

1. Ашмарин И. П., Обухова М. Ф. Регуляторные пептиды — функционально-непрерывная совокупность // Биохимия. 1986. Т. 51, № 4. С. 531–545.
2. Будилова Е. В., Карпенко М. П., Качалова Л. М., Терехин А. Т. Блокирование памяти: факты, проблемы, модели, модели // Биофизика. 2009а. Т. 54, вып. 2. С. 287–292.

3. Будилова Е. В., Карпенко М. П., Качалова Л. М., Терехин А. Т. Узнавание и воспроизведение: нейросетевая модель // Биофизика. 2009б. Т. 54, вып. 3. (в печати).
4. Веденов А. А. Моделирование элементов мышления. М.: Наука, 1988. 159 с.
5. Карпенко М. П., Качалова Л. М., Будилова Е. В., Терехин А. Т. Когнитивные преимущества третьего возраста: нейросетевая модель старения мозга // Журнал высшей нервной деятельности. 2009. Т. 59, № 2. С. 291–295.
6. Терехин А. Т., Будилова Е. В. Сетевые механизмы биологической регуляции // Успехи физиологических наук. 1995. Т. 26, № 4. С. 75–97.
7. Терехин А. Т., Будилова Е. В., Карпенко М. П., Качалова Л. М. Нейросетевое моделирование когнитивных функций мозга: обзор основных идей // Психологические исследования. 2009. № 2(4) [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://psystudy.ru>.
8. Терехин А. Т., Будилова Е. В., Карпенко М. П., Качалова Л. М., Савко Т. Г., Чмыхова Е. В. Онтогенетическая эволюция и инволюция когнитивной деятельности мозга: нейросетевой подход // Теория развития: дифференционно-интеграционная парадигма: Круглый стол. Москва, 12–13 февраля 2009 г. М.: Языки славянских культур, 2009. С. 167–182.
9. Amit D. J. Modeling brain function. The world of attractor neural networks. N. Y.: Cambridge University Press, 1989.
10. Bogacz R., Brown M. W., Giraud-Carrier C. Model of Familiarity Discrimination in the Perirhinal Cortex // J. Comp. Neurosc. 2001. Vol. 10. P. 5–23.
11. Budilova E. V., Teriokhin A. T. Endocrine networks // The IEEE and RNNS Symposium on Neuroinformatics and Neurocomputers, Rostov-on-Don. Vol. 2. N. Y.: IEEE, 1992. P. 729–737.
12. Hebb D. O. The organization of behavior. N. Y.: Wiley, 1949.
13. Hopfield J. J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // Proc. Nat. Acad. Sci. USA. 1982. Vol. 79. P. 2554–2558.
14. Hopfield J. J. Neurons with graded response have collective computational properties like those of two-state neurons // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1984. Vol. 81. P. 3088–3092.
15. Jerne N. K. Towards a network theory of the immune system. Ann. Immunol. 1974. Vol. 125C. P. 373–389.
16. Kauffman S. A. Gene regulation networks // Curr. Top. Dev. Biol. 1971. Vol. 6. P. 145–182.
17. Standing L. Learning 10,000 pictures // Quarterly Journal of Experimental Psychology. 1973. Vol. 25. P. 207–222.
18. Teriokhin A. T., Budilova E. V. Biological networks // International Workshop on Neurocomputers and Attention. Pushchino: Biol. Center Acad. Sci., 1989. P. 157.
19. Teriokhin A. T., Budilova E. V. Network mechanisms of associative therapy // Modelling, Measurement and Control. 1994. Vol. 45C, № 4. P. 1–4.
20. Varela F. J., Coutinho A., Dupire B., Vaz N. Cognitive networks: immune, neural and otherwise // Theoretical immunology. Part 2 / Ed. A. Perelson. N. Y.: Addison-Wesley, 1988. P. 359–375.
21. Weigent D. A., Blalock J. E. Interactions between the endocrine and immune systems: common hormones and receptors // Immun. Rev. 1987. Vol. 100. P. 79–108.