

СО Д Е Р Ж А Н И Е

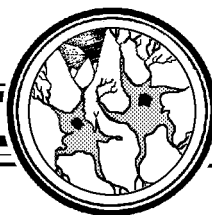
НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА И НЕЙРОНАУКА

О редактора	3
<i>Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П.</i> О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга	5
<i>Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Чернавская О.Д.</i> Схема конструкции из нейропроцессоров, способной реализовать основные функции мышления и научного творчества	21
<i>Карп В.П., Саруханов Б.А.</i> Нелинейная динамика мышления эксперта и алгоритмы расширения его профессиональных знаний на примере медицинских задач ...	36
<i>Зевеке А.В., Полевая С.А.</i> Очувствленная кожа: Специфичность динамики пространственно-временных паттернов активности механорецепторов вместо «меченных линий»	51
<i>Парин С.Б., Чернова М.А., Полевая С.А.</i> Адаптивное управление сигналами о рассогласовании в когнитивных процессах: Роль эндогенной опиоидной системы ...	65
<i>Антонец В.А., Левчук И.В.</i> Субъективная оценка семантически разнородных объектов при транзакциях обмена	75
<i>Подладчикова Л.Н., Тикиджи-Хамбурьян Р.А., Тикиджи-Хамбурьян А.В., Шевцова Н.А., Васильков В.А., Белова Е.И., Ищенко И.А.</i> Синхронизация активности нейронов различных типов в колонках зрительной коры мозга ...	83
<i>Цукерман В.Д., Еременко З.С., Каримова О.В., Кулаков С.В., Сазыкин А.А.</i> Когнитивная нейродинамика двух стратегий навигационного поведения организмов ...	96
<i>Крылов А.К.</i> Фрактальный анализ активности нейронов и поведения модели	109
<i>Соколов М.Е., Кузнецова Г.Д., Нуйдель И.В., Яхно В.Г.</i> Симулятор динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях	117
<i>Яхно В.Г.</i> Основные динамические режимы осознания сенсорных сигналов в нейроноподобных моделях: Проблемы на пути к «нейроморфному» интеллекту ...	130
<i>Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Воловик М.Г.</i> К вопросу о моделировании и анализе ИК-термокарт головного мозга человека	145
<i>Яхно Ю.В., Мольков Я.И., Мухин Д.Н., Лоскутов Е.М., Фейгин А.М.</i> Реконструкция оператора эволюции как способ анализа электрической активности мозга при эпилепсии	156
<i>Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е.</i> Анализ электрической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии: Прикладные аспекты нелинейной динамики	173
КОНФЕРЕНЦИИ. СЕМИНАРЫ. СИМПОЗИУМЫ. ШКОЛЫ	
Международная молодежная конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011», Нижний Новгород, Россия, 18–21.06.2011	183
PERSONALIA	
Памяти Леонида Павловича Шильникова	189

C O N T E N T S

NONLINEAR DYNAMICS AND NEUROSCIENCE

О редактора	3
<i>Chernavskaya O.D., Chernavskii D.S., Karp V.P., Nikitin A.P.</i> On the role of «pattern» and «symbol» concepts for simulation of the thinking process via neurocomputing.....	5
<i>Chernavskii D.S., Karp V.P., Nikitin A.P., Chernavskaya O.D.</i> The construction scheme of neuroprocessors able to realize the basic functions of thinking and scientific creativity	21
<i>Karp V.P., Sarookhanov B.A.</i> Nonlinear dynamics of an expert's thinking and algorithms of his professional knowledge expansion by example of medical problems	36
<i>Zeveke A.V., Polevaya S.A.</i> Skin sensitivity: Specificity of the dynamics of spatial-temporal patterns of activity of mechanoreceptors versus «labeled lines».....	51
<i>Parin S.B., Chernova M.A., Polevaya S.A.</i> Adaptive control signals of a mismatch in cognitive processes: The role of the endogenous opioid system	65
<i>Antonets V.A., Levchuk I.V.</i> Subjective evaluation of semantically unlike objects during exchange transactions	75
<i>Podladchikova L.N., Tikidji-Hamburyan R.A., Tikidji-Hamburyan A.V., Shevtsova N.F., Vasilkov V.A., Belova E.I., Ishenko I.A.</i> Activity synchronization of different neuron types in the columns of the cerebral visual cortex	83
<i>Tsukerman V.D., Yeremenko Z.S., Karimova O.V., Kulakov S.V., Sazykin A.A.</i> Cognitive neurodynamics two strategies navigation behavior of organisms	96
<i>Krylov A.K.</i> Fractal analysis of neuron's activity and model's behavior.....	109
<i>Sokolov M.E., Kuznetsova G.D., Nujdel I.V., Yakhno V.G.</i> Simulator of the dynamic processes of sensor signal processing in thalamo-cortical networks	117
<i>Yakhno V.G.</i> Dynamic modes of the sensor signal consciousness in neuron-like models: Ways to the «neuromorphic».....	130
<i>Makarenko A.V., Pravdivtsev A.V., Volovik M.G.</i> Problems of modeling and analysis of infrared thermo maps human brain.....	145
<i>Yakhno Yu.V., Molkov Ya.I., Mukhin D.N., Loskutov E.M., Feigin A.M.</i> Reconstruction of an evolution operator as a technique of analysis of epileptiform electric brain activity.....	156
<i>Sitnikova E.Yu., Koronovskii A.A., Hramov A.E.</i> Analysis of epileptic activity of brain in case of absence epilepsy: Applied aspects of nonlinear dynamics	173
CONFERENCES. MEETINGS. SYMPOSIA. SCIENTIFIC SCHOOLS	
Международная молодежная конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011», Нижний Новгород, Россия, 18–21.06.2011	183
PERSONALIA	
On the memory of Леонида Павловича Шильникова.....	189



О РОЛИ ПОНЯТИЙ «ОБРАЗ» И «СИМВОЛ» В МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА МЫШЛЕНИЯ СРЕДСТВАМИ НЕЙРОКОМПЬЮТИНГА

О.Д. Чернавская, Д.С. Чернавский, В.П. Карп, А.П. Никитин

Обсуждаются понятия «образ» и «символ», а также их функции в «мыслящей» системе связанных нейропроцессоров. Показано, что образная подсистема играет ведущую роль в записи и хранении информации. Введение символьной подсистемы обеспечивает переход к условной семантической информации и коммуникации с окружающей средой. Парадигма внимания в рассматриваемом подходе обеспечивается за счет параметрического влияния символьной подсистемы на образную. Показано, что эффект специализации нейронов естественно воспроизводится за счет самоорганизации системы. Предлагается система нелинейных динамических уравнений, связывающих символьную и образную подсистемы, которая потенциально способна описать «ход мысли» в индивидуальной мыслящей системе.

Ключевые слова: Самоорганизация, мышление, нейрокомпьютинг, динамическая теория информации, образ, символ, семантическая информация, специализация, взаимодействие, подсистема, внимание.

Введение

Данная работа продолжает активные исследования авторов [1–3] в области моделирования процесса мышления средствами нейрокомпьютинга, в частности, в контексте динамической теории информации [4]. Цель настоящей статьи – обсудить понятия *образ* и *символ*, их формирование, взаимодействие, а также их роль в процессе мышления.

Несмотря на многолетнюю популярность исследований процесса мышления, устоявшегося, общепринятого определения самого мышления не существует. В работе [3] было предложено следующее определение: *мышление есть самоорганизующийся процесс восприятия, обработки, сохранения, а также генерации и распространения информации без постороннего вмешательства*. Имеется в виду, что естественный обмен информацией с внешней средой, разумеется, присутствует, но запись и обработка информации производится самой *мыслящей системой*, которая

формируется в процессе *самоорганизации*. Поскольку речь идет о моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга, под «мыслящей системой» мы будем понимать *систему связанных нейропроцессоров*, различающихся характером связей между формальными нейронами.

Ключевыми понятиями в моделировании процесса мышления являются *образ* и *символ*. Их смысл интуитивно ясен, однако заслуживает уточнения. Термин *восприятие* или, что то же, *запись информации*, неявно подразумевает *кодирование* этой информации, то есть выбор средств записи, «удобных» для данной системы.

Проблема кодирования (применительно к нейропроцессорам) имеет 3 уровня.

1. *Первичное кодирование* – запись информации в виде «цепочки» *активированных нейронов*, составляющих *образ объекта*. Такое представление практически взято из физиологии: реальный (увиденный) объект *возбуждает* некоторый *набор нейронов*; при повторном предъявлении того же объекта возбуждаются те же самые нейроны. Механизмы этого процесса изучаются в специальной литературе и здесь не обсуждаются.

2. *Внутреннее кодирование* – сопоставление образу объекта (явления, ситуации) его *символа*, иными словами, *локализация образа*. Проблема сопоставления некоторому объему информации единственного символа существует во многих областях деятельности. В обычных компьютерах это происходит путем присвоения извне данному объекту его названия (например, оператор задает имя файла). Нам, однако, интересуют возможность смоделировать процесс, при котором формирование символа происходит *без постороннего вмешательства*.

3. Образование *общего кода* (например, языка). Символьная информация становится особенно конструктивной, если она является *условной*, когда одни и те же символы (слова, понятия и т.д.) имеют *одинаковый смысл* внутри какого-либо сообщества. Механизм образования общего кода является в большой степени *социальной* проблемой и выходит за рамки исследования; он подробно обсуждался в литературе, где рассматривались различные модели этого процесса (см. [4]). Далее предполагаем, что символы, сформировавшиеся в конкретной системе, *потенциально являются словами*, то есть средством коммуникации с окружающей средой.

Данная работа посвящена анализу *взаимодействия* продуктов всех трех уровней кодирования, то есть *образа, символа и слова*, а также их *роли* в процессе мышления.

1. Нейропроцессоры

Нейропроцессором будем называть пластину, населенную *формальными нейронами* общим числом n . Понятие *пластина* вводится, во-первых, исходя из «традиционной» идеологии нейрокомпьютинга и того, что именно так работают нейропроцессоры, используемые в практических целях. Во-вторых, как показано ниже, такое представление удобно для *структурирования* информации. При этом равно важную роль играют как *внутрипластинные*, так и *межпластинные связи*. Число N связей (каждого типа) оценивается как $1 \ll N \ll n(n - 1)$, то есть принимается, что каждый из n нейронов пластины связан со многими, но *не со всеми* нейронами как на «своей», так и на других пластинах.

1.1. Формальный нейрон как понятие заслуживает специального обсуждения. Изначально под формальным нейроном понимали бистабильный элемент, который может существовать *стационарно* в активном (+1) либо в пассивном (-1 или 0) состояниях. Следствием такого подхода было резко отрицательное восприятие нейрокомпьютинга физиологами. Реальный нейрон – гораздо более сложное «устройство», «организм в организме», плоды жизнедеятельности которого (метаболиты) влияют как на мозг, так и на весь организм; роль нейрона отнюдь не сводится к «рефлекторному» ответу на внешнее воздействие [5].

Для учета реальных особенностей нейрона была предложена более сложная модель ФитцХью–Нагума [6], а также ряд других (см. [7] и ссылки *ibid*), описывающих накопление потенциала, фазы возбуждения и последующей релаксации, латентную фазу и т.д. Однако по сути эти модели не слишком сильно отличаются от «оригинального» формального нейрона, если понимать последний не упрощенно, а рассматривать как объект, описываемый *нелинейным динамическим уравнением*, и учитывать не только стационарные состояния, но и всю динамику процесса. Более того, начиная исследование с достаточно простого объекта, мы далее можем его усложнять (что планируется продолжать и в дальнейшем), вводя параметры, описывающие *внутреннее состояние*. Так или иначе, важнейшим свойством реального нейрона является накопление мембранного потенциала, то есть суммирование воздействий от связанных с ним нейронов как той же пластины, так и других пластин системы – каковое свойство вполне может быть отражено через уравнения, описывающие формальный нейрон.

1.2. Процессор Хопфилда¹ – линейная аддитивная сеть, описываемая моделью

$$\frac{dH_i(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_i^H} [H_i + \beta_i(H_i^2 - 1) - H_i^3] + \sum_{j \neq i}^N \Omega_{ij} H_j + Z(t)\xi(t), \quad (1)$$

где $H_i(t)$ – переменная, описывающая состояние нейрона; τ_i^H – характерное время активации; β_i – параметр, связанный с порогом возбуждения нейрона; Ω_{ij} – матрица связей между нейронами, $i, j = 1 \dots n$. Последний член в (1) описывает случайное воздействие (*шум*), где $Z(t)$ – амплитуда, а $\xi(t)$ – случайная функция. Наличие шума обеспечивает случайную активацию не связанных друг с другом цепочек-образов, что позволяет интенсивно использовать практически всю информацию, записанную на пластине; в определенном смысле это отвечает *параллельному способу* обработки информации (см. [2]). Процессор с шумом называют еще процессором Хопфилда–Больцмана [10].

Связи Ω_{ij} модифицируются при *обучении* процессора, то есть при *активации образов*. Это свойство играет важнейшую роль и будет подробно обсуждаться ниже. Еще одно ключевое свойство процессора Хопфилда – *ассоциативность*. Цепочки, имеющие общие нейроны, связаны так, что возбуждение одной влечет за собой возбуждение и другой. Отметим еще один важный терминологический момент: фазовое пространство уравнения (1) является одновременно (и по сути) «пространством признаков» на языке теории распознавания.

¹Этот процессор предложен Дж. Хопфилдом в [8]. Однако в литературе известны высказывания (см., [7]), что аналогичные идеи предлагались ранее другими авторами (прежде всего, в [9]). Тем не менее название процессора устоялось, невзирая на упомянутую полемику.

1.3. Процессор локализации (кодирования) обычно связывают с именем С. Гроссберга [11], однако в его работах было исследовано множество вариантов процессоров с нелинейным взаимодействием, так что выделить один определенный затруднительно. Мы будем называть *процессором Гроссберга* простой вариант процессора, обеспечивающего *локализацию*, то есть преобразование какой-либо группы из нескольких объектов в один. Его математическое выражение [12]

$$\frac{dG_k(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_k} \{ -(\alpha_k - 1)G_k + \alpha_k G_k^2 - G_k^3 \} - \sum_{l \neq k} \Gamma_{kl}(t) G_k G_l, \quad (2)$$

где $G_k(t)$ – переменная, отражающая состояние «нейрона Гроссберга»: он обладает свойством самовозбуждения и имеет активное (+1) и пассивное (0) стационарные состояния; взаимодействие таких нейронов нелинейное и *подавляющее* (благодаря знаку «-»). Связи Γ_{kl} обеспечивают взаимодействие *внутри пластины*.

В начальном, необученном состоянии все связи считаются равными: $\Gamma_{kl}(0) = \Gamma_{lk}(0) = \Gamma_0$. В процессе обучения связи изменяются (τ_Γ – характерное время обучения связей Γ):

$$\frac{d\Gamma_{kl}(t)}{dt} \propto \frac{\Gamma_0}{\tau_\Gamma} \{ G_k G_l (G_k - G_l) \}. \quad (3)$$

В силу выбранных стационарных состояний 0, 1 в обучении связей участвуют лишь *активные* нейроны. В работе [12] было показано, что в результате такого обучения «выживает» только один из них, остальные подавляются.

2. Образ: запись информации и запоминание

Само понятие *информация* имеет несколько определений. Мы будем использовать то, которое было предложено Г. Кастлером: *информация есть запомненный выбор одного варианта из множества возможных и равноправных*. Это определение не только не противоречит распространенным в научной литературе дефинициям термина, но и, в отличие от них, дает содержательное представление о том, как информация возникает. А именно, необходимо *сделать* (то есть *записать*) *выбор* и *запомнить* его.

В нейрокомпьютинге обе задачи могут быть решены при помощи процессора Хопфилда. Однако важно подчеркнуть (и это подробно обсуждалось в [2, 3]), что эти задачи *дуальны* и, следовательно, должны реализоваться в *двух разных подсистемах*.

2.1. Первичная запись: формирование образов. При обучении нейропроцессора информация *возникает*: внешнее воздействие специфическим образом преобразуется и превращается в *условную информацию данной системы*. Это – самый первый и основной *акт генерации информации* (творчества). Принцип преобразования и закон обучения напрямую связаны с целевой функцией процессора.

Задача записи информации в системе нейропроцессоров, как и все прочие, должна решаться посредством самоорганизации. Иными словами, следует постулировать некие основополагающие принципы и далее исследовать, как они могут быть реализованы. Указанные принципы, по возможности, должны быть близки к реаль-

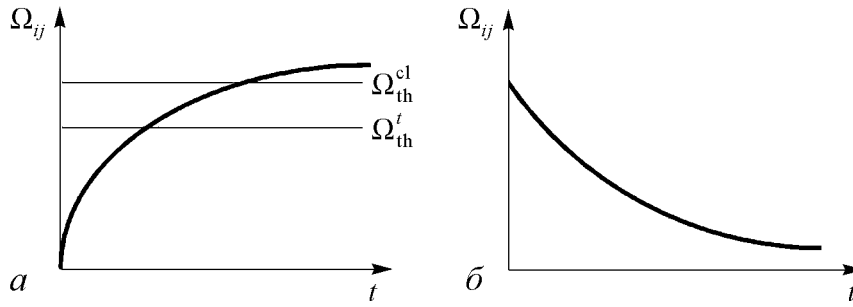


Рис. 1. Зависимость силы связи от времени и/или активности обучения для «альтернативного» варианта обучения (а) и обучения «по Хопфилду» (б)

ному, человеческому процессу мышления, поэтому для проверки их адекватности вполне уместно привлекать житейские наблюдения, аналогии и фольклор.

Здесь мы будем использовать два основных принципа записи информации.

1. Чем *чаще* активируется конкретный образ, тем *сильнее* связи между нейронами, ему соответствующими (согласно общеизвестному «повторенье – мать ученья»).

2. Одинаковые (или подобные) элементы разных объектов возбуждают *одни и те же* нейроны (аналогия: правило экономии записываемого материала, минимизация объема носителей информации). Тогда сходные в чем-то образы оказываются «сцепленными» общими нейронами, и, следовательно, возбуждение одной из цепочек, отвечающей конкретному образу, может повлечь за собой активацию и другого образа, ассоциативно связанного с ним.

Оба положения естественно удовлетворяются именно в процессоре Хопфилда, причем свойство ассоциативности (и так имманентно присущее этому типу процессора) приобретает содержательный *смысл*: ассоциация как артефакт становится ассоциацией в обычном смысле, то есть косвенной семантической связью.

Первый принцип выполняется, если обучение связей описывается уравнением

$$\frac{d\Omega_{ij}(t)}{dt} \sim \frac{\Omega_0}{\tau_\Omega} (H_i(t) + 1)(H_j(t) + 1)\zeta(t), \quad (4)$$

где Ω_0 и τ_Ω – параметры, характеризующие процесс обучения, $\zeta(t)$ – монотонная интегрируемая функция, обладающая эффектом насыщения (поскольку обучение не безгранично). Так обучаются связи только между активными нейронами, остальные участия не принимают.

Решение уравнения (4) приводит к зависимости от времени, которую иллюстрирует рис. 1, а; приведенные на рисунке величины Ω_{th}^t , Ω_{th}^{cl} – пороговые значения, смысл которых станет ясен позже.

Таким образом, информация об объекте будет записана в форме его *образа*, а еще точнее – в форме *обученных связей* между нейронами. Итак, задача *записи информации* может быть решена при помощи процессора Хопфилда, обученного согласно (4).

2.2. Запоминание и хранение важной информации. Проблема *запоминания*, казалось бы, уже решена при первичной записи. Однако сам смысл запоминания подразумевает, что оно должно быть селективно, а именно из всего записанного на-

до отобрать лишь нужное для субъекта, иначе память будет переполнена. Иными словами, должна быть решена еще и *проблема забывания*.

Учитывая принципы самоорганизации, можно предложить несколько способов забывания, имеющих право на существование и, вероятно, реализующихся в разных системах.

Один из путей – осуществить вариант «*угасания неактуального*»: связи, в течение долгого времени не используемые, «вымирают» по некоему слабому экспоненциальному закону. При повторном обращении эти связи могут восстанавливаться на прежнем уровне.

Другой путь – «*отбрасывание ненужного*» – может быть реализован в пластине Хопфилда, обученной по-другому, как было предложено самим Дж. Хопфилдом. Пусть (рис. 1, б) внутрипластинные связи *изначально велики и одинаковы*. Обучение заключается в том, что связи между нейронами, возбужденными при предъявлении данного объекта, и всеми *другими* нейронами пластины *слабеют*. Таким образом избыточные связи «отбрасываются», реализуется фильтр на отсечение лишнего, а запоминается *только один вариант* образа объекта, остальные варианты *забываются*. Закон обучения связей в этом случае имеет вид

$$\Omega_{ij}(t) = \Omega_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2T} \int_0^t [1 - H_i(t')H_j(t')] \zeta(t') dt' \right\},$$

$$\int_0^\infty \zeta(t') dt' \leq 1. \quad (5)$$

Таким образом, проблема записи и хранения информации может быть решена при помощи *двух процессоров* хопфилдовского типа. Далее первую пластину (процессор) будем называть «*размытое*» (*полное*) *множество* (H_0), вторую – пластиной «*типичных образов*» ($H_{\text{тип}}$).

Процесс записи и селекции можно представить следующим образом. Пусть на пластину H_0 записываются *все* образы, даже встреченные однократно. Образ конкретного объекта предстает в разных вариантах и потому записи этих вариантов слегка отличаются друг от друга (то есть каждый раз активируются близкие, но не одни и те же нейроны). Связи между нейронами, вообще говоря, не слишком сильны. В результате возникает *пятно*, внутри которого, однако, просматривается контур, составленный из нейронов, задействованных наиболее часто, так что связи именно между ними оказываются *сильнее остальных*.

Можно предложить следующий алгоритм *запоминания нужного* (рис. 2). Если величина связей превышает некоторый *порог* Ω_{th}^t , данная цепочка копируется (передается прямыми межпластинными связями) на другую пластину $H_{\text{тип}}$, также хопфилдовского типа, которая обучена согласно (5) и содержит только *типичные* (или *очищенные*) образы. Таким образом, связи между нейронами цепочек на пластине $H_{\text{тип}}$ *a priori* сильнее, чем связи в «*первичных*» образах на пластине H_0 (кроме того, который был выбран на роль типичного).

Подчеркнем, что часть информации при такой процедуре теряется, причем может теряться и *ассоциативность* образов (что и иллюстрирует рис. 2, б). Это не значит, что такая информация не нужна вообще, просто в данный момент (момент записи) она оказалась *не самой актуальной*. Однако в реальной мыслительной си-

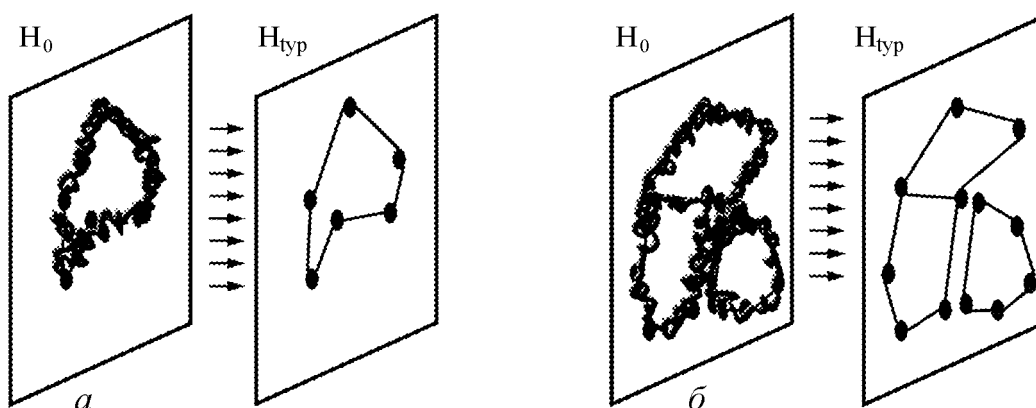


Рис. 2. Иллюстрация алгоритма запоминания отдельного образа (а) и набора образов (б)

стеме она должна оставаться доступной (на пластине H_0), что еще раз подтверждает необходимость наличия двух подсистем.

Отметим, что образы на пластине $H_{тип}$ возникают *позже* и *в результате* (с некоторой задержкой) формирования цепочек на первой пластине. Иными словами, на этапе формирования эта пластина оказывается ведомой, а *размытое множество* – ведущим.

Итак, задачи *записи* и *запоминания* могут быть решены посредством *только образов* – двух пластин Хопфилда без привлечения дополнительных процессоров. Переход *образ*→*типичный образ* сопровождается потерей части информации и фактически представляет собой ее *кодирование* (по крайней мере, сжатие). Дальнейшая самоорганизация структуры памяти, то есть выделение подпластин из множества типичных образов, необходима и возможна, однако для этого нужна *идея* или принцип такой структуры. Иначе говоря, образы в хранилище памяти должны быть распределены «со смыслом». Здесь впервые возникает потребность в *семантической (условной)* информации, первым шагом к которой является *символ*.

3. Символ: запись и хранение семантической информации

Согласно динамической теории информации, весьма важную роль играет также *условная информация* – «выбор, возникший в коллективе (обществе) в результате договоренности» [3]. Однако роль «общества» может играть и сама система («коллектив нейронов»), если под «договоренностью» понимать самоорганизацию.

Когда возникает потребность и возможность в формировании символа в рассматриваемой системе? Оговоримся сразу: этот процесс, как и любой акт самоорганизации, строго индивидуален, причем имеется в виду не вмешательство «бессмертной души», а широкий спектр возможностей, имеющих право на реализацию. В частности, символы могут не образовываться вообще. Однако наиболее естественно предположить, что сигналом к формированию символа будет большое количество записанных образов и их наложение (ср. рис. 2, б).

3.1. Формирование символа уединенного образа. Рассмотрим сначала наиболее простой процесс: формирование символа уединенного типичного образа. Пусть обучение носит декларативный характер («обучение с учителем»): некий объект

предъявляется многократно и изолированно. При этом *типичный* образ формируется относительно быстро (но и в этом случае запись образа объекта может и должна иметь несколько вариантов) и *осознанно* в том смысле, что другой альтернативы нет.

Тогда формирование символа происходит следующим образом (рис. 3, а). Образ с пластины $H_{\text{тип}}$ передается (параллельным переносом, прямыми межпластинными связями) на пластину локализации $G_{\text{тип}}$, где все нейроны, кроме одного, выбранного случайно, деактивируются, а оставшийся активным нейрон становится *символом данного образа*. После обучения связей при вторичной активации тех же нейронов произойдет быстрая (за время, меньшее характерного времени обучения связей в процессоре Гроссберга) *свертка* в тот же самый нейрон – *символ* образа. После этого прямые межпластинные связи образных нейронов «перезамыкаются» на один нейрон-символ (рис. 3, а, нижний блок).

Однако для чистоты процедуры требуется проверка, *декомпозиция* (развертка) образа из символа и сравнение его с исходным типичным образом (см. [12,13]). Этот момент требует пояснения. В рамках предложенной схемы и формальных нейронов Гроссберга случайность выбора *абсолютна*. Это само по себе красиво: описанный процесс прямо указывает на *генерацию информации*, то есть акт сугубо творческий. Более того, сделанный таким образом выбор не требует *доводов и доказательств*, это и есть та самая *своя условная информация*, защищать которую – основная цель мыслящего организма (см. [3]). В этой связи процедура «проверки», обсуждаемая в [13], казалось бы, смысла не имеет.

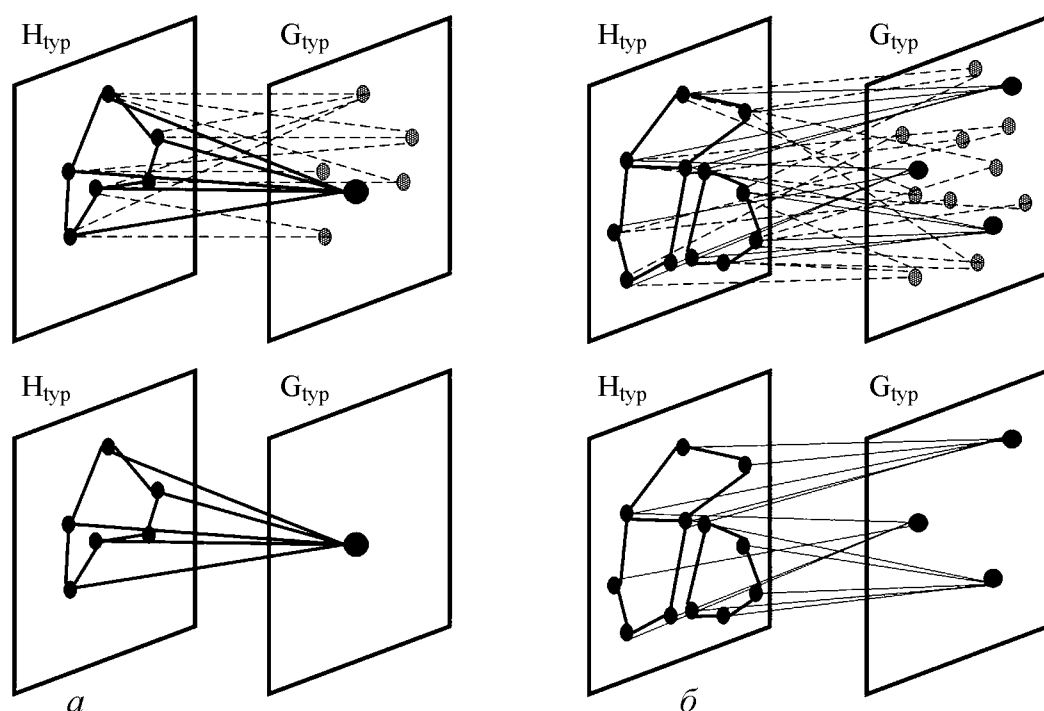


Рис. 3. Схема формирования символа образа при: а – «обучении с учителем» (уединенный образ) и б – обучении без учителя (одновременный анализ нескольких образов)

С другой стороны, если пытаться соотнести этот воображаемый процесс с реальностью, то механизм пере замыкания связей не столь однозначен. Как уже говорилось, мы принимаем изначально, что число межпластинных связей N велико, но не $n(n - 1)$, что отвечало бы ситуации «все связаны со всеми». Поэтому может оказаться, что у нейрона-«победителя», выбранного механизмом конкуренции, действующим согласно уравнению (2), нет одной или нескольких нужных связей с нейронами-«прародителями» данного образа. Тогда развертка даст образ, отличающийся от типичного.

Сказанное хорошо соотносится и с представлениями о реальном нейроне как о «сложном организме» [5], в рамках которых процесс установления связей («настройка синапсов») отнюдь не тривиален. Связи строятся так, как нейронам «удобно», и процесс настройки регулируется не уравнением (2), а метаболитами. Как следствие, далеко не каждый нейрон, выбранный на роль символа, сможет установить «контакт» со всеми нейронами своего образа.

Универсальный механизм, который может действовать как в воображаемых системах, так и в реальных – метод «попытка + проверка». На языке нейрокомпьютинга это означает, что процесс *настройки связей* должен происходить *раньше*, чем конкурентная борьба в процессоре локализации, а побеждать должен не *случайный* нейрон, а тот, который способен обеспечить полноту образа. Подобная процедура может не дать результата, а образ не получит своего символа. Тогда сам типичный образ должен быть уточнен (при помощи «диалога» с *размытым* множеством H_0). Однако вполне допустимо, что определенная часть типичных образов (не слишком часто вовлекаемых в процесс) не получает своего символа вообще.

В результате всего процесса межпластинные связи Ψ_{ik} образ \leftrightarrow символ обучаются по способу, аналогичному (4), то есть в обучении участвуют только активные нейроны

$$\frac{d\Psi_{ik}(t)}{dt} \propto \frac{1}{\tau_{\Psi}} G_k(H_i + 1). \quad (6)$$

Естественно предположить, что такие же связи устанавливаются и с типичным образом в «размытом» (полном) множестве образов. После этого характер взаимодействия *символ* \leftrightarrow *образ* очевиден: активация символа приводит к активации его образа, и наоборот.

3.2. Формирование символов «смешанных» образов. Большой интерес представляет вариант, приближенный к реальности. Предположим, что образы предъявляются и, соответственно, записываются хаотично, то есть пластина размытого множества представляет собой некую «паутину», в которой некоторые «нити» более «толстые», другие – менее, но что есть что – неизвестно. Тогда самоорганизованное формирование символов приводит не только и не столько к сжатию информации, а к *осознанию* того факта, что вся эта паутина есть набор K *отдельных образов*. Подчеркнем, что при формировании пластины *типичных образов* такой проблемы не возникает: отбираются наиболее «толстые» нити, а что к чему относится – вопрос не встает. Но для формирования символов в том случае, когда образы пересекаются (имеют общие нейроны), необходимо *отделить* их друг от друга, что есть акт высокого творчества, в результате которого генерируется совершенно новый тип информации – *семантическая информация*, то есть *осмысление* факта *цельности* определенного набора нейронов и его «отдельности» от других образов.

Задача решается при помощи того же механизма, что и в предыдущем случае, когда семантическое содержание в процесс закладывается «учителем». Типичные образы передаются на пластину локализации. Если это происходит *строго одновременно*, тогда все они могут получить *только один общий символ*, и такая ситуация тоже имеет право на существование. Если же процесс в каком-то смысле хаотичен, то возникает *перемешивающий слой* (см. рис. 3, б, верхний блок), в котором пробуются различные варианты распределения символов между данным набором активных нейронов, а метод «попытка + проверка» становится собственно *единственным механизмом* образования символов². В результате система «понимает», что к чему относится, и установившееся распределение связей (см. рис. 3, б, нижний блок) есть *своя условная семантическая информация*. Она не является единственно правильной и, соответственно, не нуждается в доказательстве. Система *интуитивно* восприняла «увиденное» именно так, а логического пути, однозначной процедуры, в этом случае нет.

После завершения описанной процедуры устанавливаются связи нейрона-символа с его нейронами-прародителями по методу (б), и активация конкретного символа приводит к активации его образа, и наоборот.

3.3. Формирование символов более высокого уровня иерархии («символ класса»). Следуя тому же алгоритму, можно представить и процесс формирования символов более высокого уровня иерархии, в частности, символа класса. В силу принципа компактности записи информации, схожие в чем-то объекты (принадлежащие к одному *классу*) записываются цепочками нейронов, имеющими общие составляющие.

На рис. 4 показана пластина типичных образов $H_{\text{тип}}$, на которой выделены три образа; их символы представлены на пластине $G_{\text{им}}$. Связи, которые являются общими для всех образов, наиболее сильны. После превышения некоторого порога $\Omega_{\text{th}}^{\text{cl}}$ (большого, чем порог образования символа, см. рис. 1, а) эта «цепочка общности» (она не является образом чего-либо, а отвечает именно *набору общих признаков*) передается на пластину G_{cl} следующего уровня иерархии, где по описанному выше алгоритму превращается в *символ класса*. Отметим, что *иерархия символов* построена по принципу: чем выше уровень символа, тем с меньшим числом нейронов-признаков он связан, и тем больше множество образов, к нему относящихся.

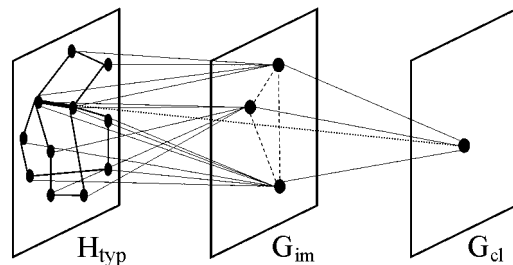


Рис. 4. Схема формирования символа класса

Как символ класса влияет на образную подсистему? По построению: активация символа класса после обучения связей непосредственно активирует лишь нейроны, которые служат общими признаками данного класса. Включает ли активация этих общих признаков какие-то конкретные образы, и если да, то какие и в какой последовательности?

²В [13] именно этот процесс происходит в блоке, называемом ВР (*back propagation*).

По-видимому, здесь более уместно говорить не о непосредственной активации кого-либо, а о *внимании* ко всему классу («огнибающая» всех образов, имеющих эти общие нейроны-признаки). Это можно реализовать *параметрически*: если допустить, что порог переключения β_i *нужных* нейронов Хопфилда (тех, которые являются общими признаками данного класса) может зависеть от активности символа этого класса G_i , то есть $\beta_i \rightarrow \beta_i(G_i)$, то все эти образы переводятся в *ждущий режим*: они еще не активны, но малейшее дополнительное воздействие приводит к их активации. Другими словами, эти образы получают *преимущественное право на активацию*, а это и есть то, что называется *вниманием* к чему-либо.

Таким образом, после обучения соответствующих межпластинных связей и настройки параметров уравнений, активация символа класса будет переводить в *ждущий режим* все образы, относящиеся к данному классу.

Символы образа и символы класса в данной схеме не связаны между собой, однако можно ввести связь символ \leftrightarrow символ, Ξ_{vk} , через хопфилдовские нейроны-«прародители»:

$$\frac{d\Xi_{vk}(t)}{dt} \propto \frac{1}{\tau_{\Xi}} G_v \left[\sum_i^M (H_i + 1) \right] G_k, \quad (7)$$

где суммирование проводится по общим нейронам-признакам данного классам.

По тому же алгоритму можно ввести и взаимодействие символов одного уровня иерархии Y_{vk} , но теперь уже через общий символ класса, то есть следующего уровня иерархии,

$$\frac{dY_{vk}(t)}{dt} \propto \frac{1}{\tau_Y} G_v^{\sigma} [G^{\sigma+1}] G_k^{\sigma}, \quad (8)$$

на рис. 4 эти связи изображены пунктиром. Характерные времена обучения τ_{Ξ} и τ_Y в этом случае, по-видимому, должны быть больше, чем для «непосредственного» обучения связей (6); впрочем, эта проблема требует самостоятельного исследования.

3.4. Обратный процесс: реконструкция образов через символы. В предыдущих разделах обсуждалось, как формируется символ на основе уже существующих образов. Возможен ли обратный процесс – возникновение образа вследствие активации символа или набора символов? Вопрос не праздный, поскольку именно так может осуществляться внешнее семантическое влияние на систему, если *символ* имеет статус *слова*, то есть носителя общего в некотором сообществе *смысла*.

Простейший случай представляет собой путь: слово-символ типичного образа \rightarrow декомпозиция \rightarrow типичный образ (например, «нейрон Билла Клинтона», см. [14] и ссылки *ibid*). Тогда активация символа (в данном случае, *называние слова*) приводит к активации его образа. Однако не каждый образ может иметь свой собственный символ, тем более отнюдь не каждый «внутренний» символ имеет соответствующее ему *слово*.

Символы более высокого уровня иерархии (так же, как и их *слова*) связаны с множеством образов. Следовательно, *конкретный образ* (даже если он не имеет своего символа-слова) может быть активирован *набором слов-символов* высокого уровня иерархии. Иначе говоря, конкретный образ можно представить как *пересечение множеств*, соответствующих данным символам, *произведению символов* в уравнении для образных нейронов (см. ниже, последний член в уравнении (10)), понятию «описать словами».

Всё сказанное верно в том случае, если данный образ *присутствует в библиотеке образов* – записан на пластине типичных образов, или хотя бы в размытом множестве. Что делать, если такого *образа в библиотеке нет*? В этом случае образ может быть *воспринят извне*, через символьную систему, но для этого требуется *воображение*, то есть реконструкция «предлагаемых обстоятельств» с использованием элементов, присутствующих в собственной образной библиотеке. *Механизм воображения* – очень интересная проблема и предмет для отдельного исследования.

4. Система уравнений, описывающая процесс мышления

Всё сказанное выше можно суммировать в форме системы связанных уравнений для двух образных и одной символьной подсистем:

$$\begin{aligned} \frac{dH_i^0(t)}{dt} = & \frac{1}{\tau_i} [H_i^0 + \beta_i(\{G_{\{i\}}^\sigma\})((H_i^0)^2 - 1) - (H_i^0)^3] + \sum_{j \neq i}^n \Omega_{ij}^0 H_j^0 + \\ & + Z(t)\xi_i(t) + \sum_j^n \Lambda_{ij}^{LR}(t)H_j^{\text{typ}} + \sum_k \Psi_{ik}G_{\{i\}}^k + \prod_\sigma G_{\{i\}}^\sigma, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \frac{dH_i^{\text{typ}}(t)}{dt} = & \frac{1}{\tau_i} [H_i^{\text{typ}} + \beta_i(\{G_{\{i\}}^\sigma\})((H_i^{\text{typ}})^2 - 1) - (H_i^{\text{typ}})^3] + \\ & + \sum_{j \neq i}^n \Omega_{ij}^{\text{typ}} H_j^{\text{typ}} + \sum_j^n \Lambda_{ij}^{RL}(t)H_j^\sigma + \sum_k \Psi_{ik}G_{\{i\}}^k + \prod_\sigma G_{\{i\}}^\sigma, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \frac{dG_k^\sigma(t)}{dt} = & \frac{1}{\tau_k} \{-(\alpha_k - 1)G_k + \alpha_k G_k^2 - G_k^3\} - \sum_{j \neq k} \Gamma_{jk}(t)G_k^\sigma G_j^\sigma + \\ & + \sum_i \Psi_{ki}H_i + \sum_l \Xi_{kl}G_l^{\sigma+1} + \sum_l Y_{lk}G_l^\sigma. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь $H_i^0(t)$, $H_i^{\text{typ}}(t)$ и $G_k^\sigma(t)$ – переменные, описывающие состояние *двух образных и одной* символьной (включая все ее уровни иерархии) подсистем, соответственно. Такое представление подчеркивает тот факт, что в данной схеме символьная подсистема связана как с типичными образами, так и с их *прообразами* в «размытом» множестве.

Отметим, что уравнения для образных подсистем фактически совпадают (по модулю учета влияния символов) с теми, которые были предложены в [2] для описания «*интуитивного*» (правополушарного – ПП) и «*логического*» (левополушарного – ЛП) мышления. Иными словами, обе работы не противоречат друг другу, если *размытое множество* отождествить с ПП, а множество *типичных образов* – с ЛП. Собственно, принципы построения этих подсистем и разделения их функций действительно совпадают в обеих работах. Система (9–11) представляет собой следующий шаг в моделировании процесса мышления.

В приведенном виде система уравнений (9–11) содержит все возможные взаимодействия типа образ \leftrightarrow образ, символ \leftrightarrow образ и символ \leftrightarrow символ. Уравнения обучения внутрипластинных связей пластин Хопфилда (Ω) и Гроссберга (Γ) приведены ранее, причем связи Ω^0 обучаются согласно «альтернативному варианту» (4),

а $\Omega^{\text{тип}}$ обучаются «по Хопфилду» (5). Взаимодействие образ \leftrightarrow символ обеспечивают связи Ψ , обученные согласно (6). Связи символа с «соседями» (Y) и символами более высокого уровня иерархии (Ξ) заданы уравнениями (8) и (7), соответственно.

Межпластинные связи Λ между образными подсистемами не должны быть симметричны ($\Lambda^{\text{RL}} \neq \Lambda^{\text{LR}}$), их назначение меняется на различных этапах формирования системы (это обстоятельство подчеркнуто выделением явной зависимости $\Lambda(t)$). На этапе образования типичного множества из размытого работают *прямые* связи, их назначение – передавать (копировать) образы, осуществляя переход образ \rightarrow типичный образ ($\Lambda_{ii}^{\text{RL}} = 1, \Lambda_{ij}^{\text{LR}} = 0$). Далее роль связей образ \leftrightarrow образ – обеспечивать постоянный «диалог» между двумя образными подсистемами. Следуя аналогии с полушариями, использованной в [2], межпластинные связи Λ естественно соотнести с *corpus colossum*. Остальные связи, меняющиеся в процессе обучения, остаются практически постоянными для *обученной* системы.

Подчеркнем, что данная система уравнений не является алгоритмом решения какой-либо конкретной задачи. Скорее, она представляет собой аналог «производящего функционала», или *язык*, пригодный для описания алгоритмов. Число подсистем можно увеличивать, выделяя специфические подструктуры («пластины» и их связи) как в образных, так и в символьной подсистемах. Именно таким образом можно построить схему конкретного устройства, способного «мыслить» (в частности, и ту, которая предлагается в [13]).

Решение такой системы уравнений (буде оно когда-либо может быть решено), то есть траектории $H_i(t)$ и $G_k(t)$, по сути, представляет собой «ход мысли». Однако необходимо помнить, что вид уравнений универсален, а сами они *строго индивидуальны* для некоторой конкретной мыслящей системы, следовательно, результат такой «работы мысли» представляет, скорее, эвристический интерес.

Заключение

Анализ роли понятий *образ* и *символ* в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга позволяет сделать ряд выводов.

- *Образные подсистемы* играют ведущую роль в записи, хранении и даже кодировании информации, причем принципиально необходимо наличие двух подсистем. Понятие *типичные образы* формируется после и на основании сформированного *размытого (полного) множества*, и связано с частичной потерей информации («забыть можно только то, что знал»). Возможность мыслить только «по Хопфилду» не противоречит основам динамической теории информации.

- Формирование символьной подсистемы (*поля условной информации*) есть следующий революционный шаг, поскольку *символьная информация является семантической*. Символы формируются только *после и на основе* формирования образов.

- На следующем шаге – от внутренней семантической информации к общеусловной, то есть к *языку общения* – символы *обеспечивают коммуникацию* с «другими мыслящими системами» по семантическому каналу.

- Параметрическое влияние символьной подсистемы на образную обеспечивает парадигму *внимания*: в данной схеме внимание есть перевод в *ждуущий режим* (понижение порогов активации) нейронов тех образов, которые связаны с активированным символом.

• Взаимодействие образного и символического «полей» представляет собой ключевой элемент в процессе мышления – по сути, это и есть процесс мышления. Предложена система уравнений для описания взаимодействия образных и символических подсистем, решение которой представляет собой «ход мысли» в индивидуальной системе.

Обсудим специально вопрос о том, насколько формальный нейрон «не похож» на реальный. Начиная с кардинального различия, мы приходим к выводу о том, что в результате *нелинейного взаимодействия* подсистем, построенных из двух типов формальных нейронов, в предлагаемой схеме воспроизводятся многие эффекты, которые, казалось бы, свидетельствуют в пользу концепции нейрона как сложного организма. Так, «нейрон Билла Клинтона» в нашей концепции есть элемент символической подсистемы, который стал таковым в результате *обучения и настройки* системы. Вообще специализация есть не изначальное, но приобретаемое свойство как для «символических», так и для «образных» нейронов, но точно то же утверждение справедливо и в отношении реальных нейронов (см. [5] и ссылки *ibid*). Однако остается область, которую не удастся формализовать адекватно в рамках предложенной схемы, – это эмоции, а их роль в процессе мышления (*эмоциональный выбор*) несомненна и очевидна. Эта проблема требует приближения модели формального нейрона к реальному.

Авторы выражают искреннюю благодарность Ю.И. Александрову за интересные и плодотворные дискуссии о проблеме формального и реального нейрона.

Работа выполнена при частичной поддержке проекта 09-07-12135 ОФИ-М.

Библиографический список

1. Чернавский Д.С., Карп В.П., Родитат И.В., Никитин А.П., Чернавская Н.М. Распознавание. Аутодиагностика. Мышление. М.: Радиотехника, 2003.
2. Чернавская О.Д., Никитин А.П., Чернавский Д.С. Концепция интуитивного и логического в нейрокомпьютинге // Биофизика. 2009. Т. 54, № 6. С. 1103.
3. Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А. Процесс мышления в контексте динамической теории информации. Часть I: Основные цели и задачи мышления / Препринт ФИАН, 2011. № 10. 20 с.
4. Чернавский Д.С. Синергетика и информация: Динамическая теория информации. М.: Наука, 2001.
5. Александров Ю.И., Анохин К.В., Безденежных Б.Н., Гарина Н.С., Греченко Т.Н., Латанов А.В., Палихова Т.А., Савельев С.В., Соколов Е.Н., Тушмалова Н.А., Филиппов В.А., Черноризов А.М. Нейрон. Обработка сигналов. Пластичность. Моделирование. Фундаментальное руководство. Тюмень: Изд. ТГУ, 2008.
6. Fitz Hugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane // Biophys. J. 1961. Vol. 1. P. 445; Nagumo J., Arimoto S., Yashukawa S. // Proc.IRE. 1962. Vol. 50. P. 2062.
7. Шамис А.С. Пути моделирования мышления. М.: КомКнига, 2006.
8. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS 1982. Vol. 79. P. 2554.
9. McCulloch W.S., Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity // Bulletin of Mathematical Biophysics. 1943. Vol. 5. P. 115.
10. Muller B., Reinhardt J. Neural networks. Springer Verlag, 1990.

11. *Grossberg S.* Studies of Mind and Brain. Boston: Riedel, 1982; The adaptive brain. Amsterdam: Elsevier/North-Holland, 1987.
12. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Васильев А.Н., Чернавская О.Д.* Математическая модель процессора локализации образа / Препринт ФИАН № 9. 2011. 17 с.
13. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Чернавская О.Д.* Схема конструкции из нейропроцессоров, способной реализовать основные функции мышления и научного творчества // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 6.
14. *Яхно В.Г., Полевая С.А., Парин С.Б.* Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов // Когнитивные исследования: Сборник научных трудов. Вып. 4 / Под ред. Ю.И. Александрова, В.Д. Соколова. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2010. С. 273.

Физический институт
им П.Н. Лебедева РАН

Поступила в редакцию 13.07.2011

ON THE ROLE OF «PATTERN» AND «SYMBOL» CONCEPTS FOR SIMULATION OF THE THINKING PROCESS VIA NEUROCOMPUTING

O.D. Chernavskaya, D.S. Chernavskii, V.P. Karp, A.P. Nikitin

The concepts of «pattern» and «symbol» and their functions are discussed in the context of «thinking» system of combined neuroprocessors. It is shown that the pattern subsystem does play a key role in *recording* and *store* of information. The *symbol* subsystem initiation provides the transition to conventional *semantic* information and communications with environment. The paradigm of *attention* within the scheme presented is secured by a *parametric effect* of symbol subsystem on the image one. It is shown that effect of neuron specification\specialization is reproduced due to self-organization of the whole system. The system of dynamical nonlinear equations is proposed to combine the pattern and symbol subsystems and thus, to describe the «*train of thought*» within an individual thinking system.

Keywords: Self-organization, thinking process, neurocomputing, dynamical theory of information, image, symbol, semantic information, specification, interaction, subsystem, attention.



Чернавская Ольга Дмитриевна – родилась в Москве (1957), окончила физический факультет Московского Государственного Университета им. М.В. Ломоносова (1980). Работает старшим научным сотрудником лаборатории элементарных частиц отделения ядерной физики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по теме «Фазовые переходы в адронной материи». Количество опубликованных научных работ – 83.

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53
Физический институт им П.Н. Лебедева РАН
E-mail: olgadmitcher@gmail.com



Чернавский Дмитрий Сергеевич – родился в Москве (1926), окончил Московский механический институт (ныне Московский инженерно-физический институт, 1950). Работает заведующим сектором теоретической биофизики отделения теоретической физики Физического института им П.Н. Лебедева РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по теме «Множественное рождение при соударении частиц высокой энергии». Профессор кафедры биофизики биологического факультета МГУ. Более 300 опубликованных научных работ, включая 10 монографий.

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53
Физический институт им П.Н. Лебедева РАН
E-mail: chernav@lpi.ru



Карп Виктория Павловна – окончила математический факультет Московского государственного педагогического института (МГПИ, 1965) по специальности «математика и программирование», факультет «Автоматизированные информационные системы» Всесоюзного института научной и технической информации (1988), Вирджинский политехнический институт и государственный университет США–Москва, Академия народного хозяйства. Имеет сертификат специалиста по коммерциализации технологий, выданный в 1996 году международным инкубатором технологий (Россия–США). Защитила диссертацию на соискание учёной степени кандидата технических наук (1970) в ИНЭУМ по специальности 05.13.01 и 05.13.16, докторскую диссертацию защитила (1999) в МИРЭА по специальности 05.13.01. Автор свыше 200 научных работ, включая 7 монографий (в соавторстве), 2 патента на изобретения, 12 авторских свидетельств Всероссийского фонда алгоритмов и программ. Профессор, доктор технических наук, академик Международной академии информатизации, член Проблемной комиссии РАМН, профессор Московского государственного института радиотехники, электроники и автоматики (технического Университета). Специалист в области интеллектуальных компьютерных систем поддержки принятия решений, математического моделирования, разработки и применения математических методов и вычислительной техники в научных и прикладных исследованиях.

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53
Физический институт им П.Н. Лебедева РАН
E-mail: karpvica@mail.ru



Никитин Александр Павлович – родился в Москве (1969), окончил физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (1992). Работает заведующим лабораторией Института общей физики РАН им. А.М. Прохорова. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «Системный анализ, управление и обработка информации» (2000). Профессор кафедры прикладной информатики в экономике Всероссийской государственной налоговой академии Минфина РФ. Количество опубликованных научных и учебно-методических работ – 194, включая 4 монографии (в соавторстве).

119991 ГСП-1 Москва, Ленинский проспект, 53
Физический институт им П.Н. Лебедева РАН
E-mail: apnikitin@nsc.gpi.ru

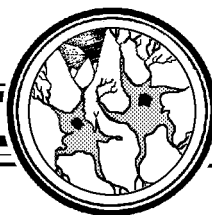


СХЕМА КОНСТРУКЦИИ ИЗ НЕЙРОПРОЦЕССОРОВ, СПОСОБНОЙ РЕАЛИЗОВАТЬ ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ МЫШЛЕНИЯ И НАУЧНОГО ТВОРЧЕСТВА

Д.С. Чернавский, В.П. Карп, А.П. Никитин, О.Д. Чернавская

Предлагается вариант построения конструкции из нейропроцессоров, которая потенциально способна решать задачи, традиционно относимые к творческим. Обсуждается роль условной информации, предлагается конструкция блока образования символа. Выделена подсистема, способная решать логические задачи. Продемонстрировано, что при распознавании процесса и его прогнозировании в символической подсистеме возможна интерполяция и экстраполяция, что приводит к понятию континуального времени. Показано, что решение творческих задач (при недостатке информации или противоречивости алгоритмов) в символической подсистеме невозможно. Обсуждаются понятия интуитивного и логического мышления применительно к нейрокомпьютерингу и их реализация в рассматриваемой схеме; предлагается концепция перехода от интуитивного к логическому.

Ключевые слова: Мышление, нейрокомпьютеринг, самоорганизация, динамическая теория информации, динамическая модель, символическая система, генерация информации, научное творчество.

Введение

В последнее время интерес к проблеме искусственного интеллекта вновь переживает несомненный подъем, на сей раз в духе синергетического подхода (см. [1–4] и ссылки *ibid*) с привлечением динамической теории информации [5,6]. На этом фоне появилось устойчивое словосочетание «пути моделирования мышления». Оно отражает тот факт, что единый подход к моделированию процесса мышления не выработан, *mainstream* в этой области пока не образовался. В данной работе проблема рассматривается с позиций представлений динамической теории информации, теории распознавания образов и нейрокомпьютеринга. Предлагается один из возможных вариантов конструкции, собранной из нейропроцессоров и потенциально способной решать определенные задачи научного мышления.

Вопрос «*Что такое мышление?*» исследовался авторами давно и активно [7–9]. В работе [9] было предложено определение мышления как *самоорганизующегося процесса записи, сохранения, обработки, обобщения и генерации новой информации*. Под *обработкой* информации при этом понимается распознавание образа (процесса), классификация, кодирование и прогноз развития событий, под ее *обобщением* – интерполяция и экстраполяция результатов обработки. Говоря о *генерации* новой информации, авторы подразумевают, прежде всего, творчество во всех его проявлениях. Наконец, определение «*самоорганизующийся*» делает акцент на том, что алгоритмы обработки и обобщения создаются в результате самоорганизации, а не привносятся кем-либо со стороны, извне.

В динамической теории информации ключевым является следующее определение. *Информация – запомненный выбор одного варианта из N возможных и равноправных* [10]. Таким образом, *генерация информации* предполагает *свободный* (случайный) выбор. Под *рецепцией информации* понимается выбор, *навязанный извне* (в результате прямого наблюдения или прямого указания). В этой связи большую роль играет *условная информация* – этот термин относится к выбору, возникшему в коллективе (обществе) в результате договоренности. Примеры условной информации (код, язык) обсуждались в [6].

Ценность информации зависит от цели, для которой она может быть использована. В рассматриваемом контексте базовая цель индивидуума – создание, сохранение и распространение «своей» условной информации. Конкретные, локальные цели, которые ставит перед собой человек, разнообразны, но подчинены базовой.

Важно, что задача сохранения (запоминания) информации и задача генерации информации *дуальны*, то есть дополнительные. В частности, в результате генерации новой информации практически всегда исчезает часть «старой» информации. Следовательно, как было показано в [8], для реализации этих задач принципиально необходимы *две разные подсистемы*, которые можно условно соотнести с левым и правым полушариями головного мозга.

Ниже мы будем использовать идеологию и термины теории распознавания образов, как то: *обучающее множество* – набор *известных системе* объектов (процессов); *целевое обучающее множество* – набор объектов, связанных с определенной целью; *пространство признаков* – многомерное пространство, в котором точка соответствует образу объекта.

Цель данной работы – предложить конкретную схему искусственной конструкции, способной решать определенные (прежде всего, научные) задачи мышления. Подчеркнем, что речь пойдет именно об искусственной конструкции, то есть на моделирование мыслительного процесса человека мы не претендуем, хотя и используем в своем рассмотрении ряд соответствующих аналогий.

1. Логическое и интуитивное мышление

Поясним, в каком смысле мы будем оперировать понятиями «логическое мышление» и «интуитивное мышление».

Термин *логика* означает искусство *убеждать словом*. Уже отсюда следует, что логическое мышление теряет смысл без владения общепринятым языком, то есть кодом, следовательно, оно обязано оперировать *символами* (но не образами).

К *логическому мышлению* следует относить решение задач на основе формализованных алгоритмов, выраженных на общепринятом языке. Под словом *алгоритм*

мы понимаем *способ вынесения суждения*. Алгоритм может быть оформлен в виде аксиомы, являющейся *обобщением опыта*; графа причинно-следственных связей; непрерывной или дискретной динамической математической модели и т.д. При этом причинно-следственные связи, лежащие в основе стандартных алгоритмов, *обще-признанны*, то есть имеют ранг *почти законов*, что и обеспечивает возможность убедить других в своих выводах. Таким образом, логические алгоритмы не индивидуальны и для подтверждения своего статуса требуют доказательства.

Отметим, что допускается потеря однозначности алгоритма при возникновении неустойчивости; в последнем случае требуется дополнительная информация, которая может быть получена путем *генерации* информации (чисто случайно или на основе индивидуальных привычек, эмоций или ассоциаций) или путем *рецепции* недостающей информации извне. Эта задача решается уже вне логики.

Следует подчеркнуть, что такое «строгое» понимание логики серьезно отличается от того, что в обыденной жизни считается «логичным». Более «мягкое» понимание логики применительно к нейрокомпьютерингу обсуждалось в работе [8].

Под *интуитивным мышлением* будем понимать вынесение суждений, *не основанных* на общепринятых причинно-следственных связях. Интуитивное мышление базируется на обобщении опыта человека, точнее, на *всем* индивидуальном опыте. Этот тип мышления манипулирует *образами*, а не символами объектов, и оперирует *ассоциативными* связями между образами. Интуитивное мышление строго индивидуально – его результат формируется внутри индивидуума и не апеллирует к «доказательству». Оба типа мышления играют важную роль и часто рассматриваются как независимые и дополняющие друг друга [11]. Тем не менее возможен переход от интуитивного мышления к логическому.

2. Аппарат мышления как конструкция из блоков нейропроцессоров

Обсудим общие свойства аппарата мышления (далее – АМ). Согласно изложенному, он не должен предполагать непосредственное привнесение в него алгоритмов извне. Тем не менее внешние воздействия необходимы и сводятся к следующему:

- внесение первичной информации из рецепторных систем;
- постановка цели самим организмом или обществом;
- внедрение общепризнанного языка (кода), поскольку без обмена информацией с членами общества мышление невозможно.

АМ должен решать задачи распознавания образа, кластеризации и классификации, прогнозирования, принятия решения, творчества. Подчеркнем, их реализации в необученном (аналог мышления ребенка) и в обученном (мышление взрослого человека) АМ различны. Предлагаемая конструкция не претендует на описание задач взаимодействия с обществом и взаимодействия с организмом (влияние организма выступает как внешнее по отношению к АМ, обратное влияние не учитывается, хотя и имеет место). Мы не претендуем также на анализ *эмоций*, роль которых в интуитивном мышлении велика, но трудно формализуема.

Обсудим кратко свойства нейропроцессоров, из которых строится АМ.

2.1. Нейропроцессор Хопфилда [12] представляет собой пластину, на которой расположены бистабильные элементы – нейроны, соединенные связями. Число связей N больше числа нейронов n , но меньше максимального числа комбинаций $n < N < n(n - 1)$.

Согласно идеологии Дж. Хопфилда, каждый нейрон стремится «переключить» те нейроны, с которыми он связан, в «свое» состояние. Переключение происходит при достижении алгебраической суммы импульсов порогового значения (то есть нейрон – сумматор импульсов). Кроме того, имеются *внешние* по отношению к данной пластине связи.

Мы будем использовать следующую математическую модель:

$$\frac{dH_i(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_i} \{H_i + \beta_i(H_i^2 - 1) - H_i^3\} + \sum_{j \neq i}^N \Omega_{ij} H_j + Z(t)\xi(t) + S(t), \quad (1)$$

где H_i – переменная нейрона со стационарными состояниями $H_i = +1$ (возбужденное), $H_i = 0$ (неустойчивое седло), $H_i = -1$ (невозбужденное); τ_i – характерное время; β_i – порог активации; связи между нейронами симметричны $\Omega_{i,j} = \Omega_{j,i}$; $Z(t)\xi(t)$ – шум (случайное хаотическое воздействие), амплитуда Z которого зависит от времени; $S(t)$ – предъявление образа, то есть возбуждение определенных нейронов по внешним связям.

Предъявление образа можно рассматривать как начальные условия, заданные на конечном отрезке времени – интервале обучения. Возбужденные извне нейроны являются признаками образа. Пространство признаков образует многомерный куб, координаты которого – состояния нейронов.

В процессоре Хопфилда ключевую роль играет обучение связей. Согласно оригинальной работе [12], обучение происходит следующим образом: при обработке образа возникают импульсы только между нейронами в противоположных состояниях. Связи исходно *сильные*, но при прохождении импульса слабеют, в чем и состоит механизм обучения. В этом случае уравнение для обучения имеет вид

$$\Omega_{ij}(t) = \Omega_0 \left\{ 1 - \frac{1}{2T} \int_0^t [1 - H_i(t')H_j(t')] \zeta(t') dt' \right\}, \quad (2)$$

$$\int_0^\infty \zeta(t') dt' \leq 1,$$

Ω_0 – исходная сила связи, T – интервал обучения.

Подобный метод обучения является по сути *фильтром*, способом «отсечения ненужного». Процессор, обученный таким образом, служит инструментом распознавания образа.

Можно предложить иной вариант обучения, обеспечивающий принцип *усиления* связей между нейронами при активации данного образа (другие связи, исходно *слабые*, при этом не затрагиваются). В этом случае математическая модель обучения имеет вид

$$\frac{d\Omega_{ij}(t)}{dt} \sim \frac{\Omega_0}{T_0} (H_i(t) + 1)(H_j(t) + 1)\zeta(t), \quad (3)$$

где $\zeta(t)$ – монотонная интегрируемая функция, обладающая эффектом насыщения. Ниже мы будем называть этот вариант обучения *альтернативным*. Такой процессор естественно использовать для *записи* информации.

В обоих случаях связи между нейронами, входящими в образ, в результате обучения оказываются *сильнее* связей между ними и нейронами, не входящими в образ.

Благодаря симметричности связей $\Omega_{ij} = \Omega_{ji}$ уравнения обученного процессора Хопфилда квазипотенциальны, то есть аналогичны уравнениям движения легкого шарика в вязкой жидкости в потенциальном поле по ландшафту, который содержит особенности, описываемые понятиями *лунки, водоразделы, сепаратрисы, русла, каналы* и т.п.

Результат распознавания в такой механической аналогии – достижение шариком определенной лунки. Координаты шарика в данный момент соответствуют положению изображающей точки в многомерном фазовом пространстве модели (3)

$$\frac{dH_i}{dt} = \frac{\partial \Xi(H_i, H_j \dots H_N)}{\partial H_i},$$

$$\Xi(H_i, \dots H_N) = - \sum_i \left\{ \frac{1}{2} H_i^2 - \frac{1}{4} H_i^4 + \beta \left(\frac{1}{3} H_i^3 - H_i \right) + \sum_j \Omega_{ij} H_i H_j \right\}. \quad (4)$$

Потенциальный ландшафт создается в результате обучения, причем лунки становятся четкими при достаточно продолжительном или многократном предъявлении образа.

Обученный процессор Хопфилда способен выполнять следующие операции.

- Запоминать предъявленные образы и отличать их друг от друга, то есть *распознавать*. Возможен отказ от распознавания, если образы слишком близки. При этом процессор заикливаясь, происходит так называемая «фрустрация».
- Классифицировать предъявляемые образы.
- Регулировать «внимание» как к определенному образу, так и к определенной части пластины. Для этого необходимо допустить действие неких *внешних связей*, не изменяющих состояние нейронов, но влияющих на порог переключения – параметр β .

Ниже мы будем использовать два типа процессоров Хопфилда, отличающихся характером обучающего множества. В первом типе обучающее множество построено не целесообразно и случайно. Такое *размытое* или «полное», множество должно быть велико и плотно: разные образы имеют общие возбужденные нейроны. Во втором типе обучающее множество невелико и построено целесообразно, путем многократного предъявления объектов, соответствующих данной цели – такое множество можно назвать «*четким*». Подобные множества формируются из размытого на базе определенного способа самоорганизации.

Оба типа играют важную роль в АМ, причем в «размытом» процессоре используется альтернативный способ обучения связей, а в «четком» – способ обучения «по Хопфилду».

2.2. Нейропроцессор Гроссберга [13] отличается от процессора Хопфилда функционально, иными свойствами характеризуются нейроны и их связи. Назначение процессора Гроссберга – локализация образа, то есть преобразование образа из нескольких возбужденных нейронов в один, который можно считать символом образа.

В пластине Гроссберга нейроны – бистабильные элементы, которые могут находиться в возбужденном (1) и пассивном (0) состояниях. Каждый нейрон способен к

самовозбуждению (порог переключения низок). Связи в общем случае несимметричны и обучаемы. Сигналы по связям могут посылать только возбужденные нейроны, стремящиеся при этом подавить все прочие. Число связей N больше n нейронов, но меньше максимального $n(n - 1)$.

Математическая модель процессора подробно рассматривалась в [14] и имеет вид

$$\frac{dG_i(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_i} \{ -(\alpha - 1)G_i + \alpha G_i^2 - G_i^3 \} - \sum_{j \neq i} \Gamma_{ij}(t) G_i G_j, \quad (5)$$

где G_i – переменная нейрона, α – параметр, Γ_{ij} – подавляющие (благодаря отрицательному знаку) связи внутри пластины.

В необученной пластине Гроссберга при предъявлении образа посредством возбуждения нескольких нейронов происходит конкуренция нейронов за сохранение своего состояния. В результате в возбужденном состоянии остается лишь один нейрон-«победитель», который и уместно именовать «символом». Символом может стать как один из нейронов – представителей образа, так и нейрон, не входивший в предъявленный образ. Выбор по сути происходит случайно в силу неустойчивости начального состояния, а вероятность выбора зависит от связей; в области скопления нейронов предъявляемого образа она выше.

Уравнение обучения связей имеет вид (T_c – характерное время обучения):

$$\frac{d\Gamma_{ij}(t)}{dt} = \frac{1}{T_c} \{ G_i G_j (G_i - G_j) \}. \quad (6)$$

После первичного обучения символ образуется однозначно в том же месте, где и в первом акте. Однако при наличии шума и не слишком глубокого первичного обучения при повторении процесса возможно «переобучение» и смена символа. При образовании символа другого образа (отличного от предыдущего) процесс протекает аналогично, но нейрон – символ первого образа – уже не должен стать «победителем».

Фазовое пространство модели (5) – то же, что и модели (1), и совпадает с пространством признаков. Несмотря на то, что модель (5) не является квазипотенциальной и механическая аналогия здесь, строго говоря, неприменима, все же для фазового пространства имеют смысл понятия *аттракторы (лунки)*, *сепаратрисы (водоразделы)* и т.д. Плоскость пластины Гроссберга представляет собой свертку многомерного признакового пространства в двумерное. Координаты символа на этой плоскости можно считать «кодом» этого символа.

3. Блоки конструкции аппарата мышления

Конструкция АМ состоит из блоков, включающих упомянутые выше процессоры. Обсудим структуру и функции этих блоков.

3.1. Блок формирования целевого множества. Рассмотрим один из возможных вариантов процесса самоорганизации имеющейся информации. На рис. 1 представлены схемы блоков из двух процессоров. Слева – до формирования целевого множества, справа – после.

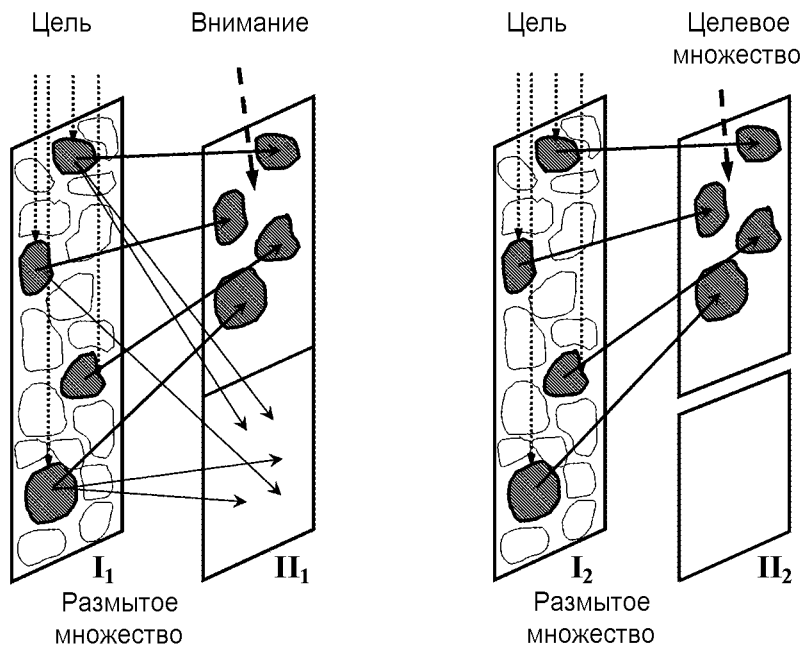


Рис. 1. Схема формирования целевого множества

На схеме слева пластина I_1 – процессор Хопфилда первого типа, содержащий *размытое* множество образов. В нем связи обучены альтернативным способом согласно (3). Пластина Π_1 – пластина Хопфилда второго типа, где связи обучены «по Хопфилду» согласно (2). Межпластинные связи обильны, не обучены, но способны к обучению аналогично (3).

Постановка цели означает, что извне, путем многократного предъявления, активируются образы конкретных объектов, соответствующих данной цели. Связи между нейронами, входящими в размытые образы, усиливаются. На языке механической аналогии: лунки целевых образов углубляются. При достижении некоего критического значения образ передается на пластину Π_1 по межпластинным связям. До их обучения образ может быть подан в произвольное место пластины Π_1 , и даже не в одно, как показано на схеме слева. Во избежание этого, одновременно с постановкой цели повышается «внимание» в определенной области пластины Π_1 (на рис. 1 – верхняя часть Π_1). В силу этого все соответствующие цели образы локализуются в области повышенного внимания. При повторении процедуры межпластинные связи обучаются, так что связи, ведущие в иные области, ослабевают или даже исчезают.

Справа на рис. 1 представлена схема обученного блока из двух пластин с аналогичными свойствами. Межпластинные связи немногочисленны, благодаря тому, что из них оставлены только ведущие в ту область пластины Π_2 , которая соответствует целесообразному множеству. В Π_2 по мере поступления образов происходит «очищение», в результате которого в них остаются только нейроны, возбуждаемые наиболее часто – образуется *типичный образ*. Процедура очищения не однозначна и при ее повторении типичный образ может несколько измениться. В результате эта область пластины Π_2 содержит набор четко различимых типичных образов, соответствующих поставленной цели.

При постановке другой цели внимание повышается уже в другой области пластины Π_1 и процедура повторяется. При этом один и тот же образ размытого множества может войти в несколько разных целевых множеств.

Представленная схема является первым шагом целесообразной классификации накопленной информации. В ней число целей счетно и невелико. Число конкретных индивидуальных целей существенно больше, но они иерархически структурированы. Схема, изображенная на рис. 1, соответствует нижнему уровню иерархии. В ней каждый типичный образ содержит достаточно много признаков.

При формировании типичного образа на каждом уровне иерархии часть информации предыдущего уровня теряется. Если впоследствии она окажется важной, то это послужит поводом к повторению процедуры, включая обращение к размытому множеству.

3.2. Блок преобразования образа в символ. Сам процесс формирования символа из типичного образа подробно обсуждается в [15,16]. Здесь мы представляем его конкретную реализацию в конструкции АМ.

Блок схематически представлен на рис. 2. Он состоит из трех частей: верхней, нижней и соединяющей их пластины Integr. Верхняя и нижняя части идентичны и состоят из 4-х процессоров каждая.

Рассмотрим сначала нижнюю часть рис. 2. Символами I,H обозначена пластина Хопфилда, на которой представлен типичный образ. Он по прямым связям передается на пластину Хопфилда II,H. С нее образ по прямым связям передается на пластину Гроссберга III,Gr, где образ локализуется и выбирается первый случайный символ.

Между пластинами III,Gr и II,H существуют разветвленные обратные связи. Каждый нейрон пластины III,Gr связан с несколькими (но не со всеми) нейронами пластины II,H. По этим связям из символа идут сигналы в обратном направлении, и на пластине II,H возникает *инверсный образ*. Эта процедура является декомпозицией символа в инверсный образ, сравниваемый с исходным. Если отличие мало, то образ в силу свойств пластины Хопфилда восстанавливается до исходного, проверка считается успешной и символ закрепляется.

Если исходный образ сильно отличается от инверсного (а это – общий случай), то возникает фибриляция (шум), которая является сигналом к повторению процедуры. При этом выбирается новое положение символа – происходит отбор наилучшего. Проверка продолжается, пока отличие исходного образа от инверсного не

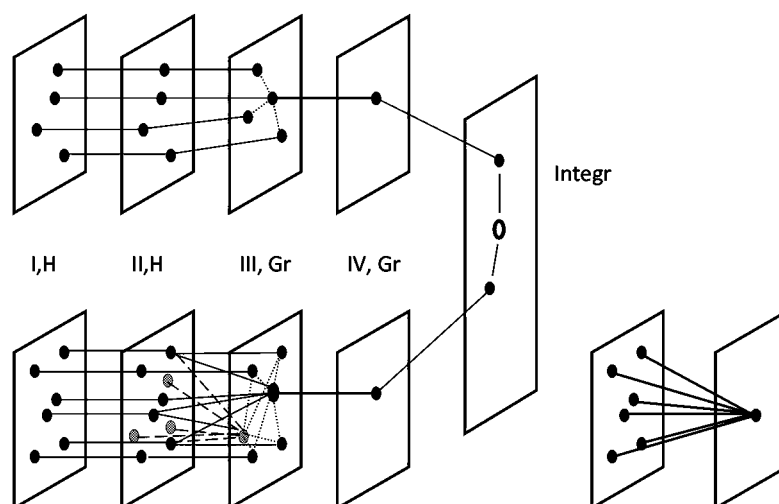


Рис. 2. Блок преобразования образа в символ

станет достаточно малым. Если проверка закончилась успешно, то символ передается по прямым связям в пластину IV,Gr. Таким образом, проверка осуществляется в процессорах II,Н и III,Gr. Именно эта пара и составляет блок *back propagation* (далее – ВР).

Итерационная процедура проверки может и не сойтись. Это означает, что блок закичивается – возникает «фрустрация», что является сигналом о том, что типичный образ нуждается в коррекции. Тогда процедура формирования типичного образа повторяется.

Когда процедуры проверки и коррекции как символов, так и образов отработаны, необходимость в ВР отпадает. Тогда образ сразу, без проверки передается по прямым межпластинным связям с I,Н на IV,Gr. Этот блок изображен на рис. 2 справа.

В случае успешной проверки возникает однозначный алгоритм преобразования образа в символ, и задача становится решаемой логически. Однако такой алгоритм индивидуален, поскольку при его построении присутствует элемент запомненной случайности (генерации информации – творчества). Код символа (его координаты на пластине IV,Gr) тоже индивидуален. Это означает, что в другом, по сути аналогичном, АМ код символа в общем случае будет другим. Поэтому отработанный в данном АМ однозначный алгоритм, строго говоря, нельзя считать логическим, так как он выражен на внутреннем, индивидуальном коде, а не на общепринятом языке. Его можно назвать невербализованной логикой – аналогично понятию «невербализованное мышление» в [1].

В верхней части рис. 2 представлен идентичный блок из четырех процессоров. В нем решается задача формирования символа образа того же объекта, но в другом пространстве признаков. Например, в нижнем блоке образ построен на признаках формы цветка, а в верхнем – на признаках запаха. Образы одного и того же объекта на верхних и нижних пластинах I,Н и II,Н различны, равно как и символы на пластинах IV,Gr. Для формирования единого символа, учитывающего все признаки, предназначена пластина Integr гроссберговского типа, на которую поступают символы с верхней и нижней пластин IV,Gr. Заметим попутно, что схема такого блока была впервые построена для описания функций аутодиагностической системы человека. Структура блока была сопоставлена с реальным органом (пластины Рекседа спинного мозга) и было обнаружено удивительное сходство [7].

3.3. Блок обобщения – интеграция символов. Выше был рассмотрен простейший случай интеграции символов. В действительности интеграция информации важна для выполнения еще двух функций.

Первая – возникновение общепринятого языка. Для этого необходимо рассмотреть несколько (хотя бы два) однотипных АМ, в каждом из которых имеется блок, изображенный на рис. 2, а в пластинах IV,Gr символы одного и того же объекта отображаются в одном и том же или схожем пространстве признаков. Как уже говорилось, в силу индивидуальности, сочетания образы↔символы в разных АМ в общем случае различны. Для формирования единого символа необходимо допустить наличие в каждом АМ интегрирующей пластины Integr. Необходимо также наличие связей (не нервных!) между этими пластинами из разных АМ. Имея иную природу, они должны передавать информацию о сочетаниях образ↔символ из одного АМ в другой АМ. В результате «конкуренции» символов в пластинах Integr может происходить коррекция индивидуальных символов. В целом эта проблема выходит за границы текущего рассмотрения и может быть решена в рамках модели «борьбы условных информаций» [6]. В ней главную роль играют не связи внутри АМ, а связи

между АМ – между «индивидуумами». Подчеркнем, что сказанное имеет отношение только к искусственным системам.

Вторая дополнительная функция интеграции информации – обобщение результатов, полученных в разных целевых множествах. Очевидно, что задача обобщения иерархична и имеет несколько уровней. Процедура интеграции символов из разных целевых множеств фактически соответствует схеме на рис. 2. Каждый акт интеграции проходит проверку и коррекцию (блок ВР) вплоть до обращения к размытому множеству. Если процедура успешна, то возникает однозначный алгоритм и необходимость в блоке ВР опять-таки пропадает.

3.4. Блок распознавания процесса и прогноза. В теории распознавания прогноз строится на основе прецедентов, то есть уже наблюдавшихся процессов. В АМ процесс наблюдается «покадрово», в дискретные моменты времени t_0, t_1, \dots, t_n распознается образ, строится его символ, положение символа проверяется блоком ВР. Далее полагаем, что, если интервал между кадрами (*скважность*) мал, то образы меняются мало, а их символы близки.

На рис. 3 приведена схема покадрового распознавания образов и формирования их символов в дискретные моменты времени t_0, t_1, \dots, t_n . На схеме слева отражены блоки проверки ВР. Они существенно замедляют процесс формирования символов. Как следствие, скважность велика, и символы могут быть расположены далеко друг от друга.

На схеме показана финальная пластина Fin, на которую последовательно передаются и где запоминаются символы. Внутрипластинные связи в ней практически отсутствуют, так как основное ее назначение – запечатлеть весь процесс с начала и до конца. Результат запоминания можно схематично представить в виде ломаной линии.

Если алгоритм обработки каждого кадра отработан и в этом контексте однозначен, то блоки ВР не нужны. Справа представлена упрощенная схема без блоков ВР, в ней покадровое распознавание ускорено и скважность существенно меньше. В результате на финальной пластине Fin процесс выглядит не как ломаная линия, а

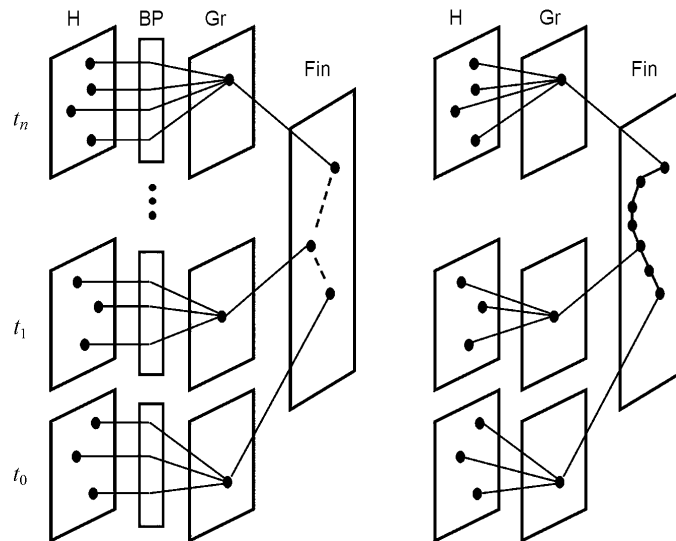


Рис. 3. Схема покадрового распознавания образов

почти как непрерывная кривая. Заметим, что эта кривая является аналогом траектории изображающей точки в математической модели процесса.

Таким образом, появляется возможность ввести понятие континуального (непрерывного) времени. Это позволяет проводить интерполяцию и экстраполяцию процесса во времени, то есть осуществлять прогнозирование. Отметим, что прогноз может оказаться ошибочным, если в какой-то момент извне поступает информация, противоречащая алгоритму. В левой части схемы на рис. 3 время воспринимается как дискретное, а при большой скважности теряются понятия «до» и «после».

4. Архитектура АМ – комбинация блоков

На рис. 4 приведена схема АМ, на которой объединены упомянутые выше блоки.

Слева представлено размытое множество образов. За ним следуют целевые множества, обсуждавшиеся в подразделе 3.1. Непосредственно далее идет блок распознавания, формирования символов и их интеграции, а также блок проверки и коррекции ВР. Именно в этой совокупности блоков «U» (обведена пунктиром) возникает *однозначный алгоритм* перехода образ→символ, который согласно определению в разделе 1 является актом *логического мышления*, выраженного на внутреннем коде («невербализованная» логика). Переход к вербализованной логике, то есть к логике в строгом понимании, является социальной задачей и на схеме не показан.

Блок ВР по своему построению содержит элемент *случайности и неоднозначности*, именно в нем происходит *генерация* информации (творческий процесс). Согласно идеологии, сформулированной в разделе 1, его следует отнести к инструменту *интуитивного мышления*. На основании всего сказанного можно предложить алго-

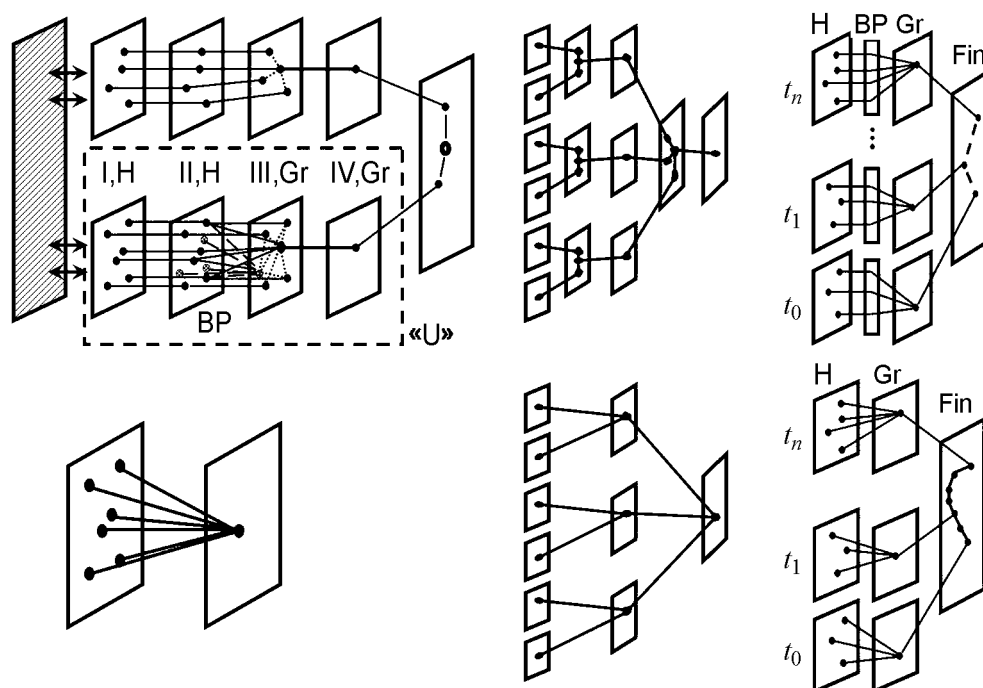


Рис. 4. Архитектура аппарата мышления

ритм выделения логической и интуитивной подсистем АМ: присутствие блока ВР в подсистеме служит индикатором ее «интуитивности», отсутствие – индикатором «логичности».

Вся верхняя часть схемы содержит блоки ВР и расположена в определенной области конструкции АМ, которую мы будем условно называть *пред-логической подсистемой* (ПП). Очевидно, что этот термин апеллирует к ассоциациям с правым полушарием человека (и был уже использован в работе [8] именно в этом качестве). Однако настаивать здесь на этой аналогии мы не можем, поскольку соответствие АМ реальному мышлению человека не обсуждается, и такая претензия была бы слишком смелой.

В нижней части схемы приведены те же блоки, но принято, что однозначные алгоритмы уже выработаны, и поэтому размытое множество и блоки ВР отсутствуют. Эта часть расположена в другой области АМ, которую уместно назвать *логической подсистемой* (ЛП) с апелляцией к левому полушарию человека (со всеми оговорками, приведенными выше). В ней присутствуют типичные образы, символы и только логические алгоритмы.

Отметим, что концепция ЛП и ПП, предложенная в [8], и рассматриваемая здесь конструкция АМ не противоречат друг другу в главном: *элемент случайности* должен отсутствовать в ЛП и присутствовать в ПП. В остальном отличия связаны с тем, что в [8] структура не конкретизировалась. В данной работе, напротив, основной целью является построение конкретного варианта самоорганизующейся конструкции, нацеленной на определенные (но далеко не все) задачи мышления. Иными словами, мы не отрицаем возможность АМ, построенного на базе иных способов самоорганизации, однако считаем, что *принцип разделения* «логической» и «интуитивной» подсистем всегда должен быть связан с *фактором случайности* (неоднозначности).

Важно, чтобы подсистемы ЛП и ПП могли работать координированно. В предлагаемой схеме это возможно, так как символы одинаковых образов в ЛП и ПП имеют одинаковый код, поскольку обученная структура первого получена копированием второго. Полагаем, что одинаковые символы связаны друг с другом так, что возбуждение одного из них в ЛП может приводить к возбуждению его аналога в ПП и наоборот.

Обсудим, как функционирует АМ, а для этого рассмотрим возможные механизмы решения типичных задач из сферы научного мышления.

Во-первых, существуют задачи, в которых однозначный алгоритм решения существует и имеется необходимая и достаточная информация для его реализации. Примером может служить решение уравнений с заданными начальными и граничными условиями. Последние задаются в АМ извне в виде набора символов – возбуждением соответствующих нейронов в ЛП. Далее задача решается в ЛП без участия ПП.

Во-вторых, распространены задачи, в которых информации для однозначного ответа достаточно, но алгоритм его получения отсутствует (например, задача Эйнштейна, головоломки типа sudoku и т.д.). Задача ставится извне в символическом виде и ответ должен быть получен в той же форме. Решение может быть получено на числовом компьютере методом полного перебора, но число вариантов при этом комбинаторно велико. В АМ такая задача может быть решена в конструкции «U», но без коррекции образа и без обращения к размытому множеству. Речь идет о последовательности актов выбора наилучшего символа.

В-третьих, есть задачи, где алгоритм решения существует, но информации для его реализации недостаточно. В АМ такая задача ставится предъявлением нетипичного образа (ряд признаков «типичного» в нем отсутствует). Задача решается в конструкции «U» в ПП.

Если нехватка информации незначительна, то в пластине Хопфилда образ самодостраивается до типичного, что и является решением. Если недостает большого объема информации, то в пластине возникает фрустрация, что служит сигналом для обращения к размытому множеству. В нем, по ассоциации с предъявленным, выбирается один из типичных образов, и задача решается. Такой выбор не однозначен и потому является актом творчества.

Обсудим, какое отношение к сказанному имеет разрешение научных парадоксов. Задача ставится изнутри, в символьном блоке на высоком уровне иерархии, при невозможности интеграции символов предыдущего уровня. Задача становится актуальной при появлении объекта, признаки которого в алгоритмах ЛП несовместимы, а решение логическим путем невозможно. В АМ проблема проявляется в том, что при попытке интеграции алгоритмов наступает фрустрация. Она и является идущим изнутри сигналом к постановке задачи.

Решается такая задача в ПП путем декомпозиции символов вплоть до образов размытого множества. В нем ищется (по ассоциациям) новый типичный образ, обладающий признаком, который ранее не был учтен. Этот образ перемещается в целевое множество. Далее происходит коррекция целевых множеств и алгоритмов обработки информации, как в ПП, так и в ЛП. После этого интеграция алгоритмов становится возможной.

Показательным примером может служить проблема обратимости. В алгоритмах динамики Ньютона все процессы обратимы во времени, в статистической физике и термодинамике процессы необратимы – энтропия может только возрастать. Рассмотрим бильярд Больцмана – набор упруго сталкивающихся шаров. С одной стороны, шары должны подчиняться алгоритмам динамики, с другой стороны, эта система – типичный пример статистического ансамбля и в ней должны действовать алгоритмы термодинамики.

Разрешение парадокса было дано в работах Н.С. Крылова [17] и Я.Г. Синая [18]: динамический процесс может стать необратимым, если он неустойчив. Процессы в бильярде Больцмана именно таковы. Новый признак, который не учитывался при построении алгоритмов динамики, – неустойчивость. Чтобы найти этот признак, необходимо было обратиться к размытому множеству. В нем устойчивые и неустойчивые динамические процессы ассоциативно связаны. Кроме того, ассоциативно связаны хаотические необратимые процессы и неустойчивость. Таким образом, признак «неустойчивость» породил новый типичный образ – неустойчивый динамический процесс и, далее, новый класс процессов – динамический хаос. Этот результат следует считать одним из главных достижений науки XX века.

Заключение

Предложен один из возможных вариантов самоорганизующейся системы (набора нейропроцессоров), реализующей определенные функции мышления. Эта искусственная конструкция – аппарат мышления – способна решать ряд задач мышления, в частности, разрешать логические научные парадоксы. В ее основе лежат положения динамической теории информации, теории распознавания и теории ней-

росетей. Вопрос, каково соответствие между предложенным АМ и реальным процессом мышления человека, не обсуждается. Совершенно ясно, что здесь необходим следующий шаг по пути интеграции наук, подключающий нейрофизиологию и нейробиологию. Тем не менее полагаем, что некоторые важные черты процесса мышления конструкция АМ описывает адекватно.

Перечислим наиболее важные результаты моделирования функционирования АМ.

- Выделено размытое обучающее множество, которое содержит всю накопленную информацию. Оно плотно, ассоциативно, но не структурировано.
- Описано формирование *целевых* образных множеств, то есть структуры памяти.
- Предложена схема блока нейропроцессоров Хопфилда и Гроссберга, который обеспечивает процедуру формирования символа образа. Структура блока фактически повторяет структуру пластин Рекседа спинного мозга.
- Выделена символично-образная подсистема, способная решать *логические* задачи и формулировать научные парадоксы.
- Показано, что решение *творческих* задач (при недостатке информации или противоречивости алгоритмов) в логической подсистеме невозможно. Они решаются путем обращения к размытому множеству, что естественно ассоциировать с интуитивным мышлением. В рамках обсуждаемой схемы предложена концепция трансформации интуитивного процесса мышления в логический.
- При распознавании и прогнозировании процесса в *символьной подсистеме* возможна интерполяция и экстраполяция, при этом возникает понятие *континуального времени* (в отличие от кадрового представления в образной подсистеме).

Изложенное в работе можно считать попыткой построить в духе синергетики «мост» между естественными и гуманитарными науками. Авторы уверены, что полный ответ на вопрос «Как человек мыслит?» возможен только на пути интеграции наук.

Работа выполнена при поддержке проекта 09-07-12135 ОФИ-М.

Библиографический список

1. Penrose R. Shadows of the Mind. NY–Oxford: Oxford University Press, 2005.
2. Шамис А.С. Пути моделирования мышления. М.: КомКнига, 2006.
3. Яхно В.Г. Проблемы на пути конструирования симулятора живых систем // Труды конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2011». С. 246.
4. Голдберг Э. Управляющий мозг; Парадокс мудрости. М.: Поколение, 2007.
5. Хакен Г. Информация и самоорганизация. Макроскопический подход к сложным системам. М.: УРСС, 2005.
6. Чернавский Д.С. Синергетика и информация: Динамическая теория информации. М.: УРСС, 2004.
7. Чернавский Д.С., Карп В.П., Родитат И.В., Никитин А.П., Чернавская Н.М. Распознавание. Аутодиагностика. Мышление. М.: Радиотехника, 2003.
8. Чернавская О.Д., Никитин А.П., Чернавский Д.С. Концепция интуитивного и логического в нейрокомпьютеринге // Биофизика. 2009. Т. 54, № 6. С. 1103.

9. Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Рожило Я.А. Процесс мышления в контексте динамической теории информации / Препринт ФИАН, 2011. № 10. 20с.
10. Quastler H. The emergence of biological organization. New Heaven, London: Yale University Press, 1964; Кастлер Г. Возникновение биологической организации. М.: Мир, 1967.
11. Фейнберг Е.Л. Две культуры. Интуиция и логика в искусстве и науке. М.: Наука, 1992.
12. Hopfield J.J. Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities // PNAS. 1982. Vol. 79. P. 2554.
13. Grossberg S. Studies of Mind and Brain. Boston, Riedel, 1982; Nonlinear neural networks: Principles, mechanisms and architecture// Neural networks. 1988. Vol. 1. P. 17.
14. Чернавский Д.С., Карп В.П., Васильев А.Н., Чернавская О.Д. Математическая модель процессора локализации образа / Препринт ФИАН, 2011. №9. 19 с.
15. Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П. О возможном механизме перехода «образ↔символ» в нейропроцессорах // Труды конф. «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях–2011». С. 224.
16. Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П. О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Изв. вузов. ПНД. 2011. Т. 19, № 6. С. 5.
17. Крылов Н.С. Работы по обоснованию статистической физики. М.: УРСС, 2003.
18. Синай Я.Г. К обоснованию эргодической гипотезы для одной динамической системы статистической механики // ДАН СССР. 1963. Т. 158. С. 1261.

*Физический институт
им П.Н. Лебедева РАН*

Поступила в редакцию 13.07.2011

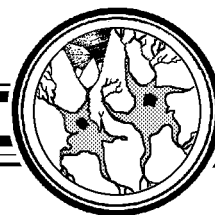
THE CONSTRUCTION SCHEME OF NEUROPROCESSORS ABLE TO REALIZE THE BASIC FUNCTIONS OF THINKING AND SCIENTIFIC CREATIVITY

D.S. Chernavskii, V.P. Karp, A.P. Nikitin, O.D. Chernavskaya

We propose a version of the neuroprocessor construction scheme, which in principle capable to solve problems commonly treated as creative work. The role of conventional information is discussed, and the specific block for the symbol formation is suggested. The system capable to solve logic problems has been pointed out. It is shown that the symbol (logical) subsystem is able to interpolate and extrapolate in the process of pattern recognition and prognosis. It is shown that creative problems (connected with the lack of information or the algorithm internal conflicts) could not be solved within the symbol (logical) subsystem. The notions of intuitive and logic thinking as applied to neurocomputing, and their realization in the given scheme is discussed. The concept of transformation of intuitive into logical thinking is presented.

Keywords: Thinking, neurocomputing, self-organization, dynamic theory of information, dynamic model, symbol system, generation of information, scientific creativity.

Авторские сведения см. на стр. 19–20.



НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА МЫШЛЕНИЯ ЭКСПЕРТА И АЛГОРИТМЫ РАСШИРЕНИЯ ЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗНАНИЙ НА ПРИМЕРЕ МЕДИЦИНСКИХ ЗАДАЧ

В.П. Карп, Б.А. Саруханов

Процесс приобретения знаний специалистом предметной области рассматривается с позиций нелинейной динамики. Выделены этапы и типы приобретаемых знаний, определяется роль интуитивного мышления в процессе принятия диагностических решений относительно сложных объектов. Рассмотрена роль методов интеллектуального анализа данных в процессе формирования новых знаний. Приводится результат использования разработанных алгоритмов «семантической интерпретации компьютерной базы знаний» на примере конкретной медицинской задачи.

Ключевые слова: Процесс приобретения знаний, интуитивные знания, интеллектуальный анализ данных, алгоритмы интерпретации компьютерных знаний, медицина.

Введение

Процесс приобретения профессиональных знаний специалистом (в любой конкретной области) рассматривается в настоящей работе в аспекте необходимости принятия ответственного решения в сложных для него ситуациях. В данном контексте «сложность ситуации» может оцениваться с различных позиций: отсутствуют априорные сведения об объектах исследования, задача не имеет аналогов, для исследования задано многопараметрическое описание требующей разрешения ситуации, сведения сформулированы не четко, «зашумлены», имеются пропуски и т.п.

Обстоятельств, усугубляющих сложность ситуации, может быть сколь угодно много, но практически все они определяют подобные ситуации как класс слабо формализованных задач и порождают необходимость расширения (приобретения новых) профессиональных знаний, в том числе с использованием современных вычислительных возможностей.

Широкое использование методов искусственного интеллекта позволило достичь значительных результатов при решении различных классов слабо формализованных задач. Особую важность эти методы приобретают при необходимости решать задачи, связанные с исследованием сложно организованных объектов в ситуациях с

неполной и/или зашумленной информацией. Этот круг задач оказался достаточно «популярным» в различных предметных областях и определился как класс задач «распознавания образов».

Технология обучения распознаванию образов на примерах («машинное обучение») оказалась весьма эффективной во многих прикладных областях. Однако трудности, с которыми встречались разработчики при внедрении программ (реализующих решение проблемы), все возрастали. Одна из основных трудностей состояла в том, что большинство правильных решений не воспринималось специалистами. Даже в тех случаях, когда компьютер находил правильное решение, разочаровывал путь решения: промежуточные ходы были «нечеловеческими». При анализе этого феномена выяснилось, что человеком решение принимается как обоснованное и истинное не тогда, когда оно удовлетворяет всем формальным критериям истинности (получено в соответствии с правилами логики), а когда оно правдоподобно, то есть удовлетворяет общим представлениям специалиста и получено в соответствии со сложившимися традициями, принятыми в данной профессии [1].

Возникло новое осмысление проблемы – интеллектуальность должна определяться не только целью, но и способом ее достижения – результат исследования должен быть интерпретирован и представлен в профессиональных терминах специалиста. В настоящей работе на примере решения конкретной медицинской задачи рассматривается принцип организации и технология исследований, предназначенные для проведения интеллектуального анализа данных с целью расширения профессиональных знаний специалиста за счет формализации его интуитивных знаний и интерпретации полученных «машинных» результатов.

Исходные позиции. Проблемы расширения знаний специалиста/ эксперта

К началу своей профессиональной деятельности *специалист* владеет некоторым, не всегда определенным, запасом знаний. Обычно большую долю его знаний на этот момент составляют так называемые *декларативные знания*, приобретенные им в процессе обучения (лекции, учебники, семинары и др.); такие знания считаются условно формализованными, ввиду того что содержат, в основном, общие известные и устоявшиеся понятия специалистов-предшественников, коллег и др., принятые в этой предметной области. Меньшую долю «багажа» составляет пока собственный *накопленный опыт* – результат самостоятельного решения задач в своей профессиональной области. Это, пожалуй, самый ценный, но и самый дорогой способ приобретения (расширения) знаний, так как результат испытания (решения задачи) может не оправдать ожидания (и нанести вред). Тем не менее и при положительном исходе, и при отрицательном формируются (устанавливаются) и запоминаются связи между набором значений параметров эксперимента, оказанным воздействием (фактором влияния) на объект и собственно результатом воздействия. Если удастся обнаружить и зафиксировать эти связи (при том и другом исходе), то можно считать, что эти связи – накопленный опыт – вполне формализованы для множества аналогичных задач. Если же в процессе решения задачи зафиксировать связи не удастся, то считается, что в дальнейшем специалист будет использовать свои *интуитивные знания*. Обычно они не формализованы, но каким-то образом могут оказаться полезными в аналогичных случаях. В процессе накопления профессионализма все большую долю будут составлять «опытные знания» за счет частичной локальной формализации интуитивных знаний.

Реальный переход интуитивных знаний специалиста в «опытные» происходит на основе сопоставления им положительных и отрицательных результатов проведенных экспериментов. При этом основной акцент анализа делается на выявлении и осмыслении неочевидных, на первый взгляд, взаимосвязей между исходными характеристиками объектов, факторами исследования и знаком самого результата (плюс или минус) эксперимента (опыта). Процесс этого перехода, с одной стороны – длительный и зачастую возвратный, так как требуется провести не один-два опыта, чтобы сформулировать достоверные заключения, а с другой – достаточно трудоемкий в силу сложности объектов исследования и самой процедуры анализа.

Очевидно, что перспектива скорейшего решения задачи формализации интуитивных знаний может оказать существенную поддержку и в решении практических задач, и в решении теоретической проблемы, которая до настоящего времени остается одной из важных задач моделирования мышления человека.

Исходные позиции. Знания эксперта и возникающие проблемы

Концепция технологии расширения знаний эксперта с использованием современных методов интеллектуального анализа данных (МИАД), рассмотрена на примере решения медицинских задач.

Медицина представляет собой слабо структурированную область знания, что создает серьезные трудности при построении систем поддержки принятия решений. В то же время, в практической деятельности врач выстраивает последовательность умозаключений, опирающихся на представления о связи наблюдаемых у больного признаков с определенным диагнозом. Быстрота принятия решения зависит, по мнению Б.А. Кобринского [2], как от квалификации и диагностического «чутья» врача, так и от особенности проявления заболевания у конкретного больного. Процесс принятия решения опирается, в первую очередь, на результат диагностики. При этом врач в неявной форме использует аппарат аргументации для подтверждения одной из гипотез – одного или, в редких случаях, сочетания двух диагнозов. Такой аппарат аргументации представляет собой неявные (интуитивные) профессиональные знания врача, накопленные им в результате практической деятельности (опыта). В то же время могут обнаружиться неальтернативные ассоциирующие признаки, обладающие почти одинаковой дифференциальной значимостью, учет которых практически никак не влияет на решение вопроса об отклонении диагностической гипотезы. Подобные ситуации порождают «конфликт» между возникшей сложной проблемой, требующей разрешения, и отсутствием необходимых аргументов для принятия диагностического решения.

По результатам проведенного нами анализа причин возникновения подобных «конфликтов» и способов их разрешения методами искусственного интеллекта, была разработана технология формирования новых знаний в проблеме формализации интуитивных знаний специалиста, представленная на рис. 1.

Следует заметить, что процесс расширения знаний специалиста является динамическим и носит явно нелинейный характер – он определяется, с одной стороны, остротой необходимости решения возникшей задачи, а с другой – наличием возможностей (способов) приобретать новые знания.

К моменту обсуждения конкретной проблемы эксперт – специалист в конкретной предметной области – имеет определенный опыт относительно возникающих си-

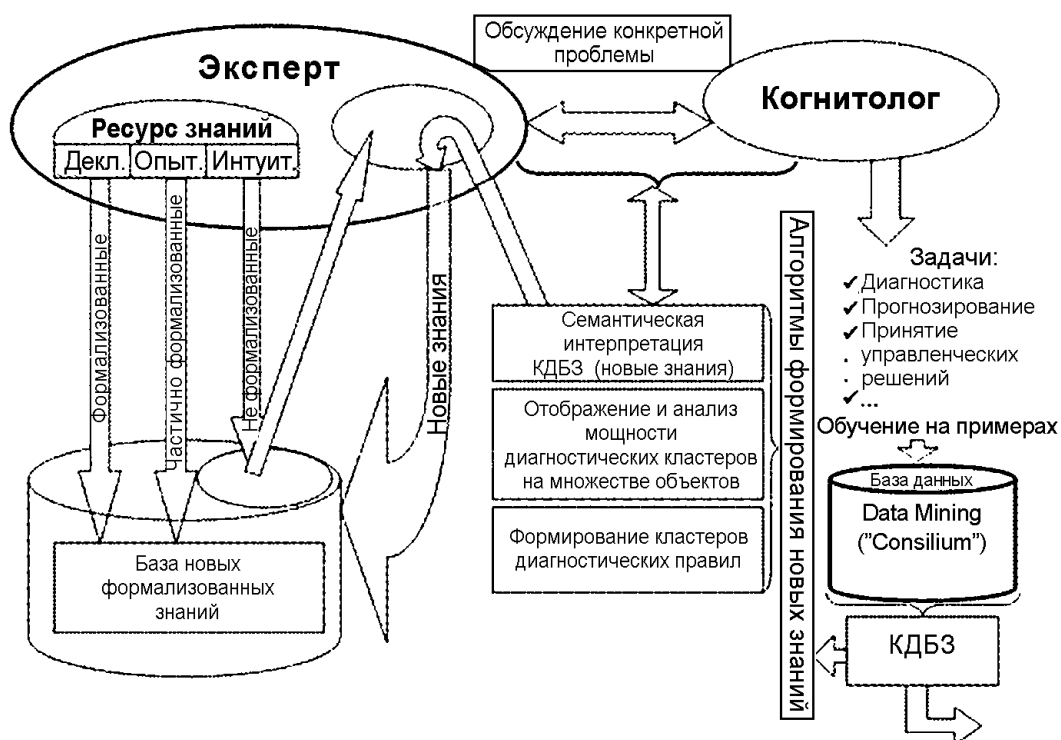


Рис. 1. Концепция расширения знаний эксперта

туаций. Одни ситуации он решает за счет так называемых декларативных знаний – сознательно приобретенных из литературных источников, лекций, конференций и др. Особенность этой категории знаний заключается в том, что они несут в себе сведения о характерных или, наоборот, абсолютно редких (и поэтому очень интересных) прецедентах, представленных другими специалистами. Такие знания могут быть использованы в будущем, но не обеспечивают необходимую надежность «переноса рекомендаций» в конкретном, состоявшемся случае. Другая категория знаний – собственный опыт эксперта, накопленный им за время решения практических задач. Он использует свой навык, зачастую не формулируя аргументацию принятого решения. Сложности начинаются тогда, когда возникают сомнения в выборе решения, и требуется «поддержка аргументацией» выбора одного или другого решения. Такие знания эксперта принято называть «интуитивными».

При возникновении подобных проблем перспективным является использование современных методов интеллектуального анализа данных, представленных в различных пакетах прикладных программ (Data Mining), предназначенных для многостороннего компьютерного исследования возникающих проблем [3–5, 8, 13, 14]. Основная цель таких методов, с одной стороны – обеспечивать корректность анализа на всех этапах исследования, с другой – предоставлять специалисту-исследователю (эксперту в конкретной предметной области) возможность контролировать процесс формирования знаний, используя промежуточные результаты, менять параметры анализа и получать конечные результаты в виде, удобном для интерпретации и т.п. При-

нятые «разумные», с точки зрения специалиста, компьютерные решения конкретной проблемы (решающие правила) получили название «база знаний» (БЗ) или «компьютерная диагностическая база знаний» (КДБЗ).

На рис. 1 отображен весь путь решения проблемы, возникшей у специалиста: от обсуждения содержания самой проблемы, постановки задач, способов решения, и до способов представления результатов анализа.

Рассматриваемая концепция предусматривает два основных этапа решения.

1. Формирование качественной (адекватной решаемой задаче) компьютерной диагностической базы знаний. Принципы и методы классификации изложены в [5].
2. Алгоритмическое обеспечение семантической (смысловой) интерпретации построенных баз знаний в профессиональных терминах специалиста.

Следует заметить, что первый этап включает решение проблемы классификации, а второй – разработку дополнительных алгоритмов для выявления и учета связей между фрагментами диагностических правил, визуализации выявленных в КДБЗ кластеров связей, обеспечивающих семантическую интерпретацию обнаруженных знаний. В данной работе этой части разработок уделяется основное внимание.

В дальнейшем полученные новые знания, сформулированные на профессиональном языке, формализованные и аргументированные, могут быть использованы в различных вариантах их тиражирования: в виде декларативных знаний, в различных консультационно-диагностических системах, экспертных системах, в системах поддержки принятия решений [5, 6, 13, 15, 16] и др.

Суть предлагаемой концепции заключается в следующем. В результате компьютерного анализа формируется так называемая компьютерная диагностическая база знаний, содержащая списки выявленных связей – диагностических правил (ДП), характерных для каждого из сравниваемых классов. Но несмотря на значительные реальные результаты при решении различных классов слабо формализованных задач, в плане расширения профессиональных знаний специалиста/эксперта построенные КДБЗ до последнего времени не использовались полностью. Это объясняется тем, что компьютерные реализации, в основном, были ориентированы на достижение эффективности распознавания, и перед ними не ставилась задача «расшифровки» полученных диагностических правил на «языке» пользователя.

Возрастание потребностей пользователей в плане понимания полученных ДП определило необходимость разработки методов дополнительного анализа построенных компьютерных баз знаний и алгоритмов, обеспечивающих максимальную интерпретацию совокупности выявленных закономерностей.

Таким образом, основными задачами данного исследования явились: разработка методов дополнительного анализа построенных диагностических баз знаний и компьютерная реализация алгоритмов, обеспечивающих интерпретацию совокупности выявленных закономерностей на профессиональном языке пользователя, с целью обобщения семантической картины проблемной области.

Эффективность подхода продемонстрирована на примере решения конкретной медицинской проблемы [9–12].

Реализация технологии формализации интуитивных знаний

Технология формализации интуитивных знаний специалиста реализована на базе модульной системы поддержки принятия решений «Consilium» [13], обеспечивающей проведение «машинного обучения на примерах», включая формирование адекватного языка описания объектов и формирование проблемно-ориентированной базы данных, преобразование исходного пространства признаков в «условно оптимальное» для поставленной задачи, выявление закономерностей, характеризующих каждый из заданных классов сравнения, построение и оценка диагностических правил, содержащихся в КДБЗ. В основе классификации используются методы поиска характерных закономерностей, часто называемых *методами перебора конъюнкций* [5,7,13,14]. Логическая схема этой группы алгоритмов основывается на эвристических соображениях о деятельности человека при распознавании образов (идея предложена М.М. Бонгардом).

В работе [5] детально изложены основные принципы и этапы решения различных классов слабо формализованных задач; определены модули, допускающие максимальную алгоритмизацию анализа данных; предложены алгоритмы, повышающие эффективность функционирования некоторых модулей; рассмотрены критерии, определяющие качество построенного решающего правила и расчет его диагностической ценности; определен горизонт практического использования КДБЗ. Там же приведена таблица сравнения результатов диагностики различными методами классификации.

В настоящее время для расширения возможностей технологии формализации интуитивных знаний разработаны дополнительные эвристические алгоритмы: «Alost – формализация интуитивных знаний эксперта» [8] и «САБЗ – семантический анализ базы знаний» [9–11,15,16], позволяющие «перевести» (интерпретировать) компьютерные закономерности в профессиональные термины специалиста. Ниже приводится описание алгоритмов САБЗ.

Алгоритмы семантического анализа диагностических баз знаний

Интерпретация экспертом результатов работы алгоритмов Data Mining является важным этапом в технологии создания баз знаний по конкретной проблеме (в частности, для решения задачи классификации). Успех на данном шаге в большой степени зависит от полноты картины, предоставленной для анализа. В процессе решения задач классификации объектов (практически любой предметной области) возникает проблема учета особенностей их описания, особенно это относится к сложно организованным объектам. Это связано с тем, что сложные объекты, как правило, характеризуются большим количеством качественных (неизмеряемых) показателей (признаков) или, например, наличием пропущенных данных, порожденных невозможностью непосредственного измерения интересующего показателя. Это вынуждает исследователей дополнять пространство основных признаков косвенными характеристиками в расчёте на то, что при отсутствии части сведений о диагностируемом объекте можно будет использовать имеющиеся косвенные признаки как для выявления

ния общих закономерностей, характерных для каждого класса состояний, так и для диагностики конкретного объекта. Однако ДП, построенные на таком смешанном пространстве, могут оказаться статистически или содержательно коррелированными между собой, что может исказить результаты и диагностики, и осмысления проблемной области в целом.

Выходом из данной ситуации является уточнение и расширение представлений эксперта об обобщённой картине проблемной области, формируемой набором ДП. В этом случае специалист может интерпретировать не только каждое правило в отдельности, но и оценить всю совокупность правил БЗ, построенных для каждого из сравниваемых классов (А – «Неблагополучные», В – «Благополучные»). Разработанный алгоритм САБЗ [16] предназначен для формирования у специалиста обобщённого представления о структуре проблемной области. На рис. 2 представлена схема алгоритма. Идея его основывается на гипотезе о том, что симптом, образующий наибольшее количество связей с другими симптомами, может выступать в качестве базового, образующего кластер смыслового объединения этих симптомов.

Работа алгоритма начинается со сбора сведений о том, каков состав каждого правила в КДБЗ для каждого из классов (А и В); у какого количества объектов оно проявляется, и у каких именно. Данная информация позволяет сформировать картину взаимосвязей между самими ДП внутри одного класса. Этот аспект весьма важен для данной ситуации, поскольку представление базы знаний в виде наборов продукционных правил (а именно такая форма представления БЗ подвергается анализу) не позволяет явно оценить степень взаимосвязи между двумя отдельными конъюнкциями.



Рис. 2. Схема алгоритма семантического анализа базы знаний

Применение алгоритма САБЗ позволяет выявлять группы ДП БЗ, близкие по смысловому составу; такие группы названы кластерами. Семантический анализ на основе кластеров позволяет получить более полную картину ситуации в каждом конкретном сегменте проблемной области. Это, в свою очередь, облегчает интерпретацию экспертом результатов диагностики.

На рис. 3 представлен фрагмент (доминирующий кластер) выявленных алгоритмом связей между ДП КДБЗ, построенных для одного из классов сравнения (для класса А).

Рассмотрим структуру кластера. Симптом, имеющий наибольшее количество связей с другими симптомами базы знаний («базовый») будет располагаться в основе схемы связей в паре с симптомом, с которым он образует наибольшее количество правил. В результате на схеме отображены два «базовых» симптома (55 и 59), совместно образующие подкластер 1, а также два других подкластера (2 и 3), каждый из которых образуется своим «ведущим» симптомом.

В первый подкластер входят ДП, в которых участвуют оба базовых симптома (такие правила называются «корневыми»), а также «смежные» с ними правила. Под смежными в данном случае понимаются ДП, имеющие в своём составе один из базовых симптомов и один из симптомов корневых правил (например, 59-289).

Во второй подкластер входят оставшиеся не отмеченными на схеме ДП из базы знаний, содержащие первый базовый симптом (например, 55-94-77).

В третий – содержащие второй базовый симптом (например, 59-126-77). Эти два подкластера (второй и третий) называются «крыльями». Каждый кластер может содержать до трех подкластеров.

«Доминирующий» кластер (обычно первый), построенный на основе наиболее «активного» симптома в базе знаний, обладает важным свойством: он всегда

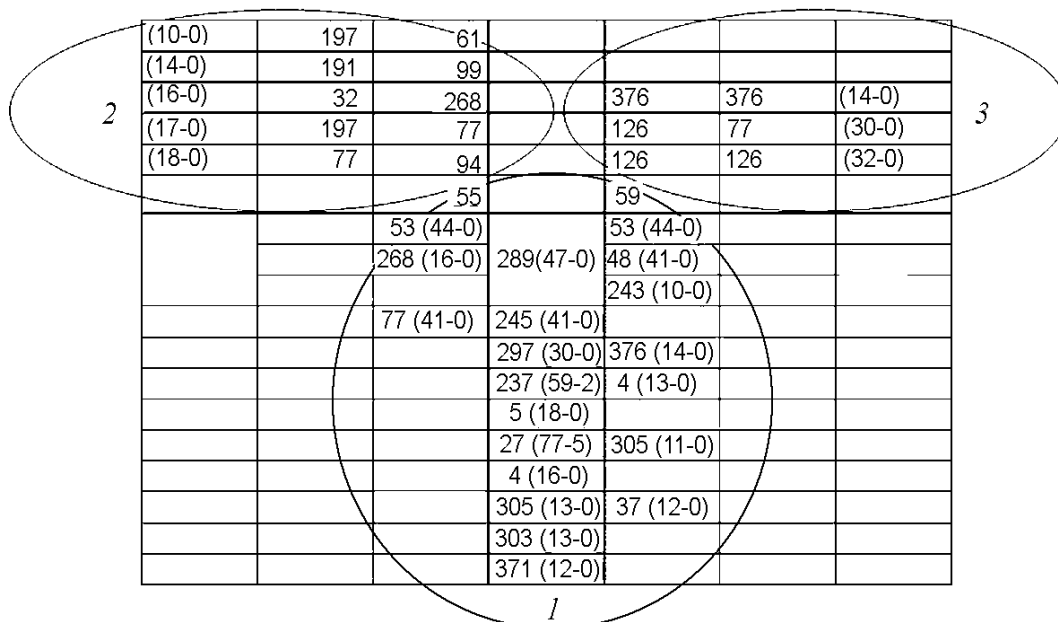


Рис. 3. Доминирующий кластер диагностических правил для класса А («Неблагополучные»)

охватывает большее количество объектов исследуемого класса, чем все последующие кластеры. Поэтому базовые элементы этого кластера могут оказаться наиболее значимыми (информативными) при принятии решения по принадлежности объекта к классу.

На рисунке построенного кластера в ячейках рядом с номерами симптомов, участвующих в конъюнкциях, в скобках указано количество объектов, у которых было обнаружено данное правило (через дефис указаны количества объектов класса А – «Неблагополучные» и класса Б – «Благополучные», соответственно). Над базовыми симптомами изображены «крылья» – подкластеры, в составе которых есть только один из двух базовых симптомов.

Последующие кластеры могут оказаться частично или полностью в зоне охвата доминирующего кластера или охватывать область, не смежную с ним. Это может означать, что в материале исследования присутствуют объекты-прецеденты, то есть редко встречающиеся случаи.

Анализ и интерпретация содержания всех остальных выявленных кластеров проводится аналогичным образом.

Интерпретация кластеров связей компьютерной диагностической базы знаний по конкретной медицинской задаче

Медицинская (прикладная) цель исследования была сформулирована следующим образом: «Приобретение новых объективных знаний относительно оценки состояния новорожденных, родившихся от матерей, перенесших сифилис» (Задача «ДВС»).

Требовалось:

- провести сравнительный анализ данных неблагополучного и благополучного исхода беременности и определить набор показателей, характерных для этой категории пациентов;
- сформировать диагностические правила (ДП) оценки состояния новорожденных при неблагополучном и благополучном исходе беременности;
- выявить группы риска относительно основных факторов заболевания ВС;
- сравнить группы новорожденных при скрытом раннем сифилисе у матери;
- определить диагностические критерии оценки состояния новорожденных при отсутствии у них клинических проявлений ВС.

Исходный материал исследования составили данные по 1363 случаям рождения детей от матерей, серопозитивных по сифилису, полученные в результате проведенного в 2003–2004 годах эпидемиологического исследования в семи регионах РФ. В исследование вошли 315 анкет: из них – все подтвержденные случаи «неблагополучного» исхода (кл. А – 165) и с «благополучным» исходом (кл. В – 150).

С использованием модульной системы «Consilium» [5,13], основанной на методе перебора конъюнкций, были построены диагностические правила для каждого из заданных классов исхода (А и В). Сформированная КДБЗ состоит из двух списков диагностических правил, представленных в виде конъюнкций номеров симптомов (симптом – одно из возможных значений признака).

В целом, КДБЗ представлена в виде продукционной модели. В диагностических списках, допущенных к голосованию, оказалось порядка 50–60 правил (для каждого класса). На основе КДБЗ разработана консультативно-диагностическая интеллектуальная система для диагностики новорожденных (ИС-ДВС) [15].

В табл. 1 приведен фрагмент базы знаний – диагностические правила, сформированные по классу А. В первом столбце данной таблицы приведены порядковые номера некоторых выбранных для иллюстрации ДП. Во втором – номера тех симптомов, которые входят в конкретное ДП. Далее два столбца, отражающие количество объектов (из класса А и из класса В), имеющих данное ДП. Затем – рассчитанное значение диагностической информативности ДП. В крайнем правом столбце приведен содержательный смысл каждого ДП. Аналогично представляются ДП класса В.

При диагностическом голосовании для конкретного пациента каждое ДП участвует независимо от других, что вполне приемлемо, если эти ДП независимы между собой, в противном случае требуется учитывать это обстоятельство.

Из таблицы видно, что при большом объеме ДП очевидным преимуществом является представление базы диагностических правил в виде кластеров.

На рис. 4 изображены подкластеры 1, 2, 3 – фрагменты кластера, представленного ранее на рис. 3, и их интерпретация специалистами.

Таблица 1

Пример диагностических правил для класса А

№ ДП (п/п)	Номера симптомов входящих в ДП			Количество объектов из класса		Вес ДП	Предметное описание диагностической закономерности
				А	В		
1	55	59	289	47	0	3.384	Отсутствие дородового лечения матери, приведшее к положительным н/т у новорожденного
15	126	77	48	30	0	2.954	Диагноз сифилиса у матери, установленный на сроках беременности ≥ 33 недель, явившийся причиной клинических проявлений ВС у новорожденного
24	77	77	197	20	0	2.574	Отсутствие профилактического лечения у матери, когда во втором триместре беременности показатель индекса н/т находился в пределах значений 0.75–1.0 (3+)
34	4	55	59	16	0	2.370	Отсутствие дородового лечения у матерей в возрастной группе < 19 лет
50	61	61	197	10	0	1.955	Неадекватное лечение матери (непенициллиновая терапия, либо пенициллиновая терапия, законченная за 30 дней до родов), индекс н/т во втором триместре беременности которой находился в пределах значений 0.75–1.0 (3+)
61	237	55	36	15	1	1.801	Отсутствие специфического лечения вторичного сифилиса у матери до беременности при сохранении степени позитивности н/т к моменту родов, равной 4+

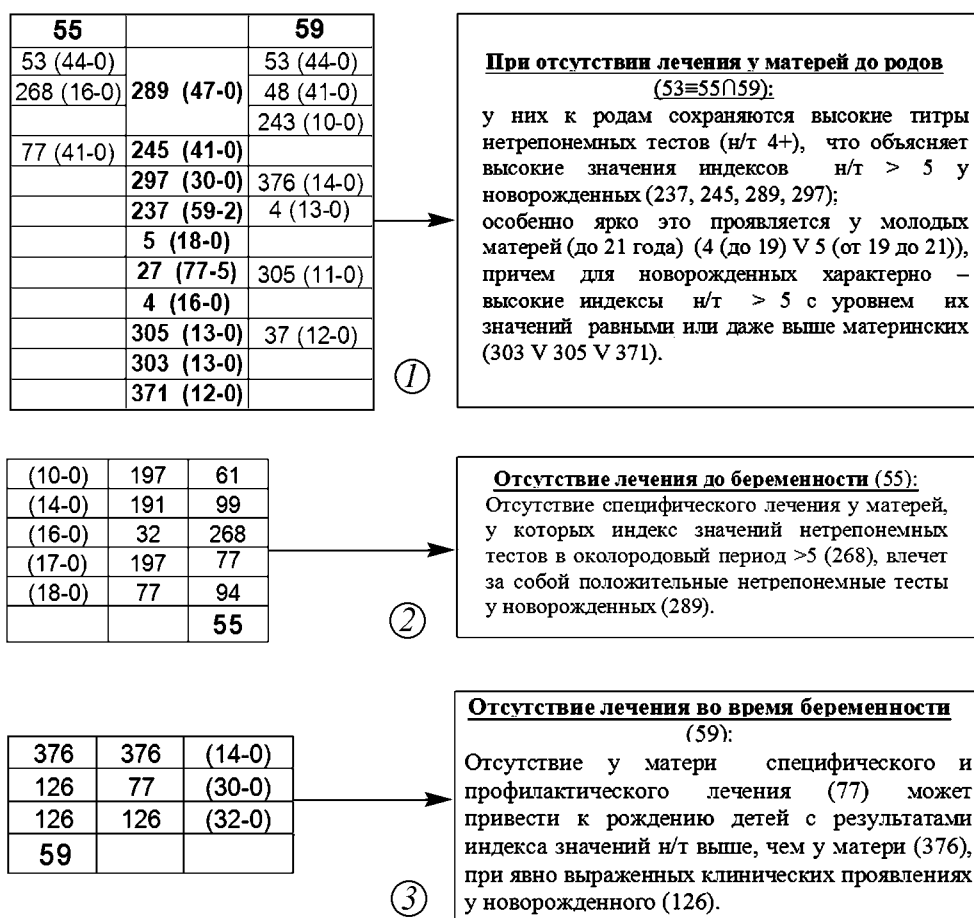


Рис. 4. Подкластеры 1, 2, 2 доминирующего кластера класса А

Интерпретация обобщенной картины связей между участвующими ДП становится очевидной и облегчает осмысление основных (типичных, характерных и т.п.) закономерностей проблемной области.

Семантическая интерпретация данной структуры показала, что наиболее «активным» симптомом в правилах класса «Неблагополучные» оказался симптом под номером 55 – «объект не лечился в первой половине наблюдений». Больше всего конъюнкций с ним образовал симптом 59 – «объект не лечился во второй половине наблюдений». По сути, все правила корневого подкластера, включая смежные боковые, подразумевают, что объект наблюдений не проходил лечения вовсе (симптом 53 ≡ 55 ∩ 59). Диагностические правила БЗ, содержащие данные симптомы, существенно чаще встречаются в КДБЗ класса «Неблагополучные».

Форма представления содержательной структуры проблемной области в виде кластеров позволяет обнаружить (увидеть) дополнительные связи между симптомами, участвующими в разных диагностических правилах БЗ, но оказавшимися в составе одного кластера. Это облегчает задачу специалисту, ведущему построение обобщенной картины проблемной области по совокупности анализа всех кластеров, выявленных алгоритмом.

Отображение мощности диагностических кластеров на множестве объектов исследования

Параллельно с построением кластеров система определяет и те объекты, которые оказываются «охваченными» формируемыми кластерами. Для этого регистрируется информация о том, какие правила были обнаружены у каждого объекта.

Для каждого кластера указывается список номеров объектов в БЗ, охватываемых им, а также общее количество охваченных объектов каждого из рассматриваемых классов. Это позволяет оценить диагностический вес кластера, например, с помощью функции правдоподобия [5].

Алгоритм отображения мощности диагностических кластеров предназначен для ответа на очень важный для специалиста вопрос – каков состав объектов, охваченных кластером в целом и его подкластерами.

Если кластер охватывает значительное количество объектов одного класса (и почти не «захватывает» объекты другого класса), то он интерпретируется экспертом как значимый, характерный (типичный) для данного класса диагноза, даже если он не был известен ранее.

Если кластер охватывает лишь небольшую группу объектов в одном классе диагнозов, то, скорее всего, он отражает подмножество объектов со специфическими характеристиками (прецеденты).

Если же кластер охватывает небольшую группу объектов как в одном, так и в другом классе, – такой кластер не очень полезен с точки зрения решения конкретной задачи диагностики, но может нести ценную информацию о наличии объектов в переходном состоянии или образующих подкласс на данном множестве объектов по каким-то иным причинам.

В табл. 2 представлен пример расчета параметров мощности доминирующего кластера класса «Неблагополучные» (представленного на рис. 3).

Для каждого подкластера (1, 2, 3) и для кластера в целом (1V2V3) приведены расчетные величины и количества объектов, входящих в каждый из них, а также их доля относительно общего количества объектов в соответствующем классе.

Оценка индивидуального и совместного вклада подкластеров конкретного кластера учитывается алгоритмом в два этапа. Индивидуальным вкладом подкластера считается количество объектов, имеющее конъюнкции этого подкластера, за исключением тех объектов, которые могут быть узнаны двумя другими подкластерами этого же кластера. Так, например, потенциал подкластера 1 составляет (97-5) объектов, а цена его вклада при наличии двух других подкластеров составляет (49-5), так как остальные 48 объектов (15+16+17) могут быть узнанными двумя другими подкластерами (2 или 3). Из полученного анализа можно сделать вывод, что кластер в целом характерен для 72% объектов класса «Неблагополучные», и есть подозрение, что 3% объектов другого класса – «Благополучные» – имеют сходные характеристики с объектами подкластера 1, входящего в этот кластер.

Таблица 2

Мощность подкластеров и кластера

Подкластер	1	2	3	Мощность кластера (1V2V3)
Мощность подкластера (кол-во объектов)	97-5	53-0	34-0	119-5
Мощность подкластера (%)	59-3	32-0	21-0	72-3

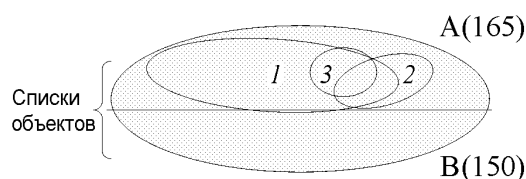


Рис. 5. Оценка мощности кластеров на множестве объектов исследования (кл.А)

На рис. 5 приведен пример графического отображения результатов работы алгоритма (см. табл. 2). Изображены доминирующий кластер и три его подкластера, охватывающие достаточно большую часть объектов – 72%, входящих в класс А, и включающие 3% объектов класса В.

Таким образом, на основе оценки мощности кластера можно сформулировать семантическую оценку степени отражения им обобщённой картины проблемной области заданного класса.

Заключение

Рассмотрены проблемы, возникающие у специалиста в процессе приобретения и расширения своих профессиональных знаний. Определена роль интуитивных знаний в принятии решений относительно сложно организованных объектов. Сформулированы условия и факторы, обеспечивающие мотивацию расширения своих профессиональных знаний.

Показано, что процесс расширения знаний специалиста является динамическим и носит явно нелинейный характер – он определяется, с одной стороны, острой необходимостью решения возникшей проблемы, а с другой – наличием возможностей (способов) приобретения новых знаний.

Рассмотрены возможности и перспективы использования современных методов интеллектуального анализа данных.

Разработана технология и представлена концепция расширения профессиональных знаний эксперта. Технология обеспечивает выполнение всех этапов решения проблемы, возникшей у специалиста: от обсуждения самой проблемы, постановки задачи, способов решения и способов представления результатов анализа.

В рамках предложенной технологии разработан программный комплекс алгоритмов САБЗ, предназначенный для формирования у специалиста обобщенного представления о структуре проблемной области.

Эффективность использования методов интеллектуального анализа данных и разработанных алгоритмов семантического анализа базы знаний продемонстрирована на реальной медицинской задаче.

Список используемых сокращений

БЗ – база знаний

ВС – шифр медицинского диагноза

ДВС – шифр конкретной медицинской задачи

ДП – диагностическое правило

ИС-ДВС – интеллектуальная система диагностики ВС

КДБЗ – компьютерная диагностическая база знаний

САБЗ – семантический анализ базы знаний

Библиографический список

1. *Губерман Ш.А.* Искусственный интеллект-88 и «Продуктивное мышление» М. Вертгеймера (1945; рус. перевод М.: Прогресс, 1987) // Вопросы психологии. 1990. № 1. Тематические сообщения. С. 100.
2. *Кобринский Б.А.* Логика аргументации в принятии решений в медицине // НТИ, сер. 2, 2001, № 9. С. 1.
3. *Барсегян А.А., Куприянов М.С., Степаненко В.В., Холод И.И.* Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336.
4. *Дюк В., Самойленко А.* Data Mining. СПб.: Питер, 2001.
5. *Карп В.П.* Интеллектуальный анализ данных в проблеме построения решающих правил классификации //Новости искусственного интеллекта. 2006. № 2. С. 57.
6. *Чернавский Д.С., Карп В.П., Родитат И.В. и др.* Распознавание. Аутодиагностика. Мышление. Синергетика и наука о человеке. М.: ИПРЖР, 2004.
7. *Бонгард М.М.* Проблемы узнавания. М.: Наука, 1967. 320.
8. *Карп В.П., Огурчикова А.Л.* Интеллектуальная система структурного анализа групп сравнения сложноорганизованных объектов // Сб. научных трудов 59-й научно-технической конференции МИРЭА. М., 2010, Ч. 1. С. 14.
9. *Карп В.П., Саруханов Б.А., Сафарова Э.А.* Алгоритм обнаружения и учета скрытых связей в диагностических базах знаний по конкретной проблеме // Сб. научных трудов 59-й научно-технической конференции МИРЭА. М., 2010, Ч. 1. С. 18.
10. *Карп В.П., Саруханов Б.А., Сафарова Э.А.* Алгоритм семантического анализа диагностической базы знаний в системах поддержки принятия решений // Материалы XI ежегодной специализированной конференции и выставки «Информационные технологии в медицине». М.: «Консэф», 2010. С. 154.
11. *Карп В.П., Саруханов Б.А.* Современные интеллектуальные технологии анализа данных в развитии диагностических баз знаний // Сборник научных тезисов XVIII Международ. конференции «Математика. Компьютер. Образование». Пущино, 2011. С.100
12. *Карп В.П.* Интеллектуальный анализ данных в проблеме формализации интуитивных знаний эксперта // Сб. трудов конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» 2011: Ин-т приклад. физики. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. С. 82.
13. *Карп В.П.* Программа для ЭВМ для построения решающих правил классификации (Консилиум-1) // Всероссийский фонд алгоритмов и программ (РосАПО). М., 1994. № 940206. 28 с.
14. *Карп В.П., Чернавский Д.С., Никитин А.П.* Способ определения кинетических параметров электрических потенциалов точек акупунктуры при диагностике организма и устройство для его осуществления. Государственный реестр изобретений, Патент № 2093134 от 20.10.97.
15. *Карп В.П., Саруханов Б.А.* Интеллектуальная система диагностики заболеваний

новорожденных от инфицированных матерей. Патент РФ на полезную модель Государственный реестр полезных моделей РФ № 108675 от 20.09.2011.

16. *Карп В.П., Саруханов Б.А.* Система анализа базы знаний. Авторское Свидетельство Гос. Рег. программы на ЭВМ № 2011617361. Реестр программ для ЭВМ 21.09.2011.

*Физический институт
им. П.Н. Лебедева РАН
Московский государственный
институт радиотехники,
электроники и автоматики*

*Поступила в редакцию 12.07.2011
После доработки 14.11.2011*

NONLINEAR DYNAMICS OF AN EXPERT'S THINKING AND ALGORITHMS OF HIS PROFESSIONAL KNOWLEDGE EXPANSION BY EXAMPLE OF MEDICAL PROBLEMS

V.P. Karp, B.A. Sarookhanov

The process of a problem area experts knowledge acquisition is considered from a nonlinear dynamics positions. Stages and types of acquired knowledge are marked out; the role of an intuitive thinking in decision process concerning complex objects is defined. The role of intelligent data analysis methods in new knowledge forming processes is defined. The result of a developed «Semantic computer knowledge base analysis» algorithm is given on an example of the concrete medical problem.

Keyword: Knowledge acquiring process, intuitive knowledge, intelligent data analysis, computer knowledge interpretation algorithms, medicine.

Авторские сведения Карп В.П. см. на стр. 20.



Саруханов Баграт Артурович – родился в Москве (1985), окончил Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет, 2002). Является аспирантом кафедры информационных систем МИРЭА с 2009 года по направлению «Системный анализ, управление и обработка информации». Автор 8 научных статей по указанному направлению.

119270 Москва, пр-т Вернадского, 78
Московский государственный институт радиотехники,
электроники и автоматики
E-mail: allerit@yandex.ru



ОЧУВСТВЛЕННАЯ КОЖА: СПЕЦИФИЧНОСТЬ ДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫХ ПАТТЕРНОВ АКТИВНОСТИ МЕХАНОРЕЦЕПТОРОВ ВМЕСТО «МЕЧЕННЫХ ЛИНИЙ»

А.В. Зевеке, С.А. Полевая

Благодаря развитию методов регистрации динамики пространственно-временных паттернов активности в нервной системе получены фундаментальные факты, свидетельствующие об интегративной природе сенсорного кода и несостоятельности «локализационистских» теорий. В работе приведены электрофизиологические данные и модели, указывающие на интегративные механизмы кодирования информации в периферическом отделе кожного анализатора у человека и животных. Приведено описание специфических структур импульсного потока в волокнах кожного нерва для пяти основных модальностей: «прикосновения», «вибрация-дуновение», «холод», «боль», «тепло». На основе нейробиологических исследований и математического моделирования предлагается новая схема организации сенсорного канала, связанного с кожей.

Ключевые слова: Кожа, механорецепторы, сенсорные коды, коллективная динамика, модель.

Введение

Развитие физиологии кожного анализатора – один из самых одиозных примеров победы удобной логичной модели над фактами. До сих пор в учебниках физиологии тиражируется гипотеза «меченных линий», предложенная фон Фреем, который обнаружил неоднородность локальных температурных ощущений на коже («холодовые точки», «тепловые точки»). Он предположил, что для каждой модальности ощущений, связанных с кожей, существуют изолированные каналы со специфическим входом на коже, специфическими рецепторами, специфическими волокнами и специфическими центрами. Список фактов, доказывающих эту модель, весьма ограничен:

- на коже выявлены «точки», обладающие специфичностью по отношению к температурным, механическим и разрушающим (ноцицептивным) сигналам;
- описана разнообразная морфология окончаний внесинаптических дендритов, выполняющих функцию рецепторов кожи [1,2];
- определены оптимальные стимулы для одиночных волокон кожного нерва.

Этих весьма скромных доказательств хватило, чтобы гипотеза специфичности фон Фрея была возведена в ранг теории, при этом принято игнорировать следующие факты:

- никто и никогда не доказал, что «точка» кожи и связанные с ней волокна имеют одинаковую специфичность; наоборот, показано, что от одной чувствительной «точки» сигнал передается по множеству разнопороговых волокон кожного нерва [3];
- не удалось обнаружить волокна, отвечающие преимущественной активностью на нагревание [4];
- установлено, что все волокна кожного нерва являются механочувствительными и механическое состояние кожи существенно влияет на физиологические и субъективные отображения любого сигнала [5–7];
- специфические центры для «меченных линий» так и не удалось обнаружить и, более того, установлено, что на сигналы разных модальностей возникают паттерны активности в одних и тех же зонах коры [8].

Эти факты убедительно доказывают, что «локализационистский подход» к информационно-системе, связанной с кожей, далек от биологической правдоподобности. Однако попытки втиснуть данные в «прокрустово ложе» «меченной линии» продолжают до сих пор. Недавно [9] *in vitro* были выявлены активируемые температурой ионные каналы, принадлежащие к семейству TRP (transient receptor potential) катионных каналов. И хотя у одних температура активации 42°C, у других – 50°C, и встречаются эти каналы не в нервной, а преимущественно в эпителиальной ткани, авторы объявляют свое открытие «ключом к молекулярным основам температурной, тактильной и болевой рецепции». Власть доминирующей модели существенно смещает фокус внимания исследователей и мешает видеть факты, свидетельствующие о ключевой роли интегративной активности множества разнопороговых механорецепторов кожи в формировании первичного сенсорного кода.

Специфичность динамики пространственно-временных паттернов активности механорецепторов при разномодальных воздействиях на кожу

Единая механорецепторная природа рецепторов кожи обнаружена не только по косвенным признакам [10–44], но и прямыми измерениями. В работах Е.М. Цирульникова [45–50] показано, что в каждой точке кожи можно чистым механическим стимулом (ультразвуком) вызвать ощущения любой модальности в соответствии с продолжительностью ультразвуковых импульсов. С помощью интегративных методов регистрации и анализа распределения импульсной активности по совокупности нервных волокон, передающих сигнал от одного участка кожи (метод «встречных потоков», метод кросскорреляции), было показано, что:

- при растяжении и давлении изменяется активность в 90% волокон кожного нерва;
- при охлаждении изменяется активность в 80% волокон кожного нерва;
- при нагревании уменьшается спонтанная активность, существующая в А-волокнах до внешней стимуляции;
- на повреждающие (ноцицептивные) воздействия реагируют до 95% волокон кожного нерва.

Эти данные не оставляют места для специфичности, поскольку из них однозначно следует, что одни и те же волокна возбуждаются при разномодальных воздействиях и, с другой стороны, мономодальные стимулы изменяют импульсацию¹ во множестве афферентных волокон. Очевидно, что код сенсорной информации следует искать в пространственно-временной структуре (паттерне) суммарной активности множества афферентных волокон.

Детальное исследование интегративного афферентного потока при действии чистых мономодальных раздражителей позволило дать описание периферического сенсорного кода в пространстве амплитудно-временных параметров импульсной активности в волокнах Аβ, Ад и С:

- уровнем фоновой (спонтанной) активности;
- количеством активных волокон Аβ, Ад и С;
- максимальной частотой импульсов в волокнах Аβ, Ад и С;
- продолжительностью импульсации в волокнах Аβ, Ад и С;
- градиентом нарастания ответа в волокнах Аβ, Ад и С.

Физиологический смысл кодовых параметров афферентного паттерна в настоящее время достаточно хорошо изучен. Количество активируемых афферентных волокон при данной интенсивности стимула зависит как от свойств кожи, вызывающих затухание механической волны по мере ее распространения, так и от наличия разнопороговых рецепторов. Частота импульсации является функцией интенсивности действующего раздражителя и тем больше, чем сильнее стимул. Продолжительность ответа непосредственно связана с процессами адаптации механорецепторов и зависит от характера механических перестроек в коже под действием внешнего стимула [13,51]. Скорость нарастания разряда до максимума можно рассматривать как отражение пространственно-временной динамики распространения возбуждения между слоями вязко-упругой кожной матрицы [52–55].

Этот набор параметров необходим и достаточен для выделения следующих модальноспецифичных паттернов (рис. 1).

- При чистом механическом воздействии (прикосновение) пространственно-временной рисунок активности характеризуется одинаковыми плотностями импульсных потоков по Аβ-, Ад- и С-волоконам. Максимум активностей приходит в центральную нервную систему сначала по Аβ-, затем по Ад- и в последнюю очередь по С-волоконам.
- При холодном раздражении кожи формируется паттерн низкочастотной импульсации большого количества С-волокон. Активность в Аβ-, Ад-волоконках незначительна. Максимум активности передается в центральные отделы кожного анализатора сначала по С-, затем уже по Аβ-, Ад-волоконкам.
- При умеренном тепловом раздражении информация от кожи передается не увеличением, а снижением уровня тонической импульсации в А-волоконках.
- Действие воздушного потока на волосистой покров кожи аналогично действию вибрации и отображается большой плотностью импульсного потока в Аβ-, Ад-волоконках. С-волокна в этом случае почти не принимают участия в передаче сообщения или активирована их малая часть.

¹Импурсация является реакцией нейронов на стимул и представляет собой поток импульсов в нервных волокнах.

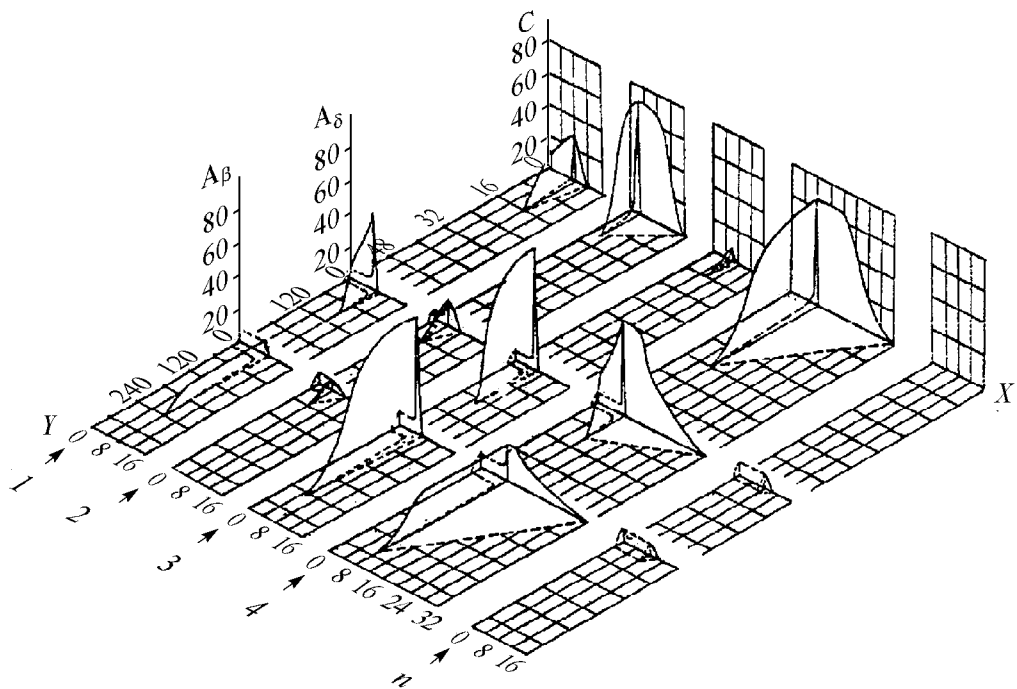


Рис. 1. Пространственно-временные структуры афферентных кодов от рецепторов кожи. По оси z – активные волокна (%), x – время (с), y – частота афферентных импульсов. 1 – «прикосновение», 2 – «холод», 3 – «воздушный поток», 4 – «боль», 5 – «тепло». Рисунок взят из работы Антонец В.А., Зевеке А.В., Малышева Г.И., Полевая С.А. Исследование пространства сенсорных кодов с точки зрения оценки возможности синтеза дополнительных сенсорных каналов в системе «человек–машина». Радиофизика. 1994. Т. 6, № 4. С. 100

- При повреждающих раздражениях пространственно-временной рисунок активности отличается самой большой плотностью импульсного потока, скоростью нарастания и продолжительностью в С-волокнах. Максимум активностей приходит в центральную нервную систему сначала по волокнам А δ , затем по А β и в последнюю очередь по С-волокнам. При некоторых ноцицептивных раздражениях наступает синхронизация активности в С-волокнах [56].

Для центральных механизмов обработки информационного сигнала от кожи ключевую роль играет временная последовательность поступления максимального сигнала по А β -, А δ - и С-волокнам. Значимость этого фактора получила подтверждение в исследовании динамики событийно связанного потенциала в соматосенсорной коре при особом режиме раздражения нерва *radialis superficialis*: селективной электрической стимуляции А β и селективной активации А δ с помощью CO $_2$ -лазера [6, 7]. Было показано, что последовательность поступления сигнала по волокнам разного типа играет существенную роль для формирования нейрональных репрезентаций активности рецепторов кожи в соматосенсорной коре.

Особое внимание привлекает проблема «болевого» сигнала от кожи. Такой сигнал возникает на сверхсильное или повреждающее воздействие. Хотя проблема периферических механизмов боли ещё далека от решения, в учебных курсах физиологии она замаскирована метафорами «болевы рецепторы» и «ноцицептивные волокна». Обнадеживающие результаты принесли исследования паттерна ак-

тивности в волокнах кожного нерва в ответ на повреждающие воздействия. При разрушении клеток кожи в межклеточное пространство выделяются высокоактивные вещества, раздражающие непосредственно немиелинизированные С-волокна [38–40, 57, 58], соответственно паттерн активности в кожном нерве отличается самой большой плотностью, скоростью нарастания и продолжительностью импульсного потока в С-волокнах.

Таким образом, каждой модальности соответствует специфическое распределение плотности импульсного потока по волокнам разного типа.

Однако, как механорецепторы выполняют роль термодатчиков? Для ответа на этот вопрос обратимся к физико-химическим свойствам кожи. Основу кожи составляет фибриллярная сеть из термолабильного белка коллагена, который сжимается при охлаждении и расслабляется при нагревании [18]. Существенно, что коллагеновая сеть распределена по слоям кожи неоднородно: в поверхностных слоях кожи коллагеновые пучки тонкие, тесно переплетены и располагаются почти параллельно поверхности; в глубинных слоях кожи рыхлая сеть состоит из толстых коллагеновых пучков, петли значительно шире, изобилуют жировые включения. Механическая структура кожи аналогична по свойствам двухслойной системе, состоящей из более упругого поверхностного и более вязкого глубинного слоев, при этом механическая анизотропия *in vitro* значительно меньше, чем *in vivo* [52–54]. Внутри кожной матрицы располагаются древовидно разветвленные окончания нервных волокон, конечные веточки которых проникают между соединительнотканными и эпителиальными клетками, обвивая наружные корневые влагалища волос. Плотность окончаний внесинаптических дендритов (рецепторов кожи) на коже кончика пальца человека составляет около 60000 на 1 см². Ключевую роль в организации связи между внеклеточной средой и сенсорными окончаниями играют молекулы гликозаминогликанов межфибриллярного матрикса и интегрины плазматической мембраны рецепторов, обеспечивающие межклеточные контакты. Гликозаминогликаны и образующиеся с их участием комплексы протеогликанов вступают в характерные взаимодействия с коллагеном и формируют из коллагеновых фибрилл непрерывную сеть между отдельными клетками и органами, заполняя все пространство, окружающее нервное окончание. Эта сеть, вследствие термолабильности коллагена, является механотемпературной возбудимой средой, в которой функцию датчиков выполняют механорецепторы кожи. Коллаген реагирует на изменение температуры изменением длины фибрилл, что вызывает изменение конформации интегринов и открытие ионных каналов; благодаря этому механическая структура околорецепторного пространства преобразуется в структуру афферентной активности в волокнах кожного нерва. Поскольку состав внеклеточного матрикса при изменении внешних условий и, прежде всего, условий температурной адаптации изменяется, иным становится и характер связи между внеклеточным матриксом и мембраной нервных окончаний, что проявляется в изменении чувствительности рецепторов.

Установлено, что механорецепторы различных слоев кожи обладают достоверно различными диапазонами чувствительности к температурным и механическим воздействиям [59]. Можно предположить, что для раздражителей разных модальностей формируются специфические распределения деформаций по слоям кожи. Соответственно, если каждый рецептор отражает механическое смещение в ближайшей окрестности, то трехмерный массив механорецепторов, распределенных по слоям

кожи, отображает амплитудно-временное распределение деформации по трехмерному пространству кожи. Таким образом, специфический пространственный паттерн деформаций отображается в специфическом паттерне активности механорецепторов и, соответственно, в специфическом паттерне импульсной активности в волокнах кожного нерва.

Моделирование сенсорного сигнала от механорецепторов кожи

На основе данных о реологической структуре кожи [60–62] и динамических режимах электрических реакций механорецепторов [63–65] была разработана реологическая модель, описывающая распределение вязких и упругих деформаций в коже и динамику активности в быстроадаптирующихся (фазических) и медленноадаптирующихся (тонических) волокнах кожного нерва, отражающих стационарный и динамический компоненты реологических реакций.

Известно, что полная деформация кожи складывается из упругой, эластической и пластической деформаций. Для кожи характерна как релаксация напряжения, так и «ползучесть». При внезапном растяжении кожи на определенную величину напряжение резко возрастает, а затем постепенно исчезает вследствие необратимых деформаций. И наоборот, когда кожа, находящаяся в растянутом состоянии, внезапно укорачивается, напряжение сильно падает и после этого выходит на меньший равновесный уровень. Под действием постоянной приложенной силы длина кожного лоскута изменяется не мгновенно, а во времени, причем скорость деформации прямо пропорциональна приложенному напряжению. Иными словами, механические свойства кожи во многих отношениях аналогичны свойствам реологической модели Бюргера в механике², объединяющей модели Кельвина и Максвелла. Адаптированная к задачам, рассматривающим реологические процессы в живых тканях, комплексная модель (рис. 2) состоит из модели Максвелла (последовательно соединенные вязкий η_1 и упругий E_1 элементы) и модели Кельвина-Фогта (параллельно соединенные вязкий η_2 и упругий E_2 элементы). Здесь упругие деформации определяются упругим элементом E_1 , эластические – элементом Кельвина-Фогта, пластические – вязким элементом η_1 .

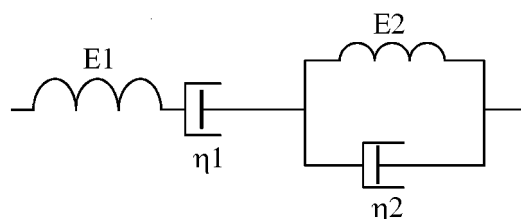


Рис. 2. Реологическая система, состоящая из модели Максвелла, образованной последовательно соединенными упругим и вязким элементами, и модели Кельвина-Фогта, образованной параллельно соединенными упругим и вязким элементами

Напряжение в упругом элементе E_1 изменяется по закону Гука

$$\sigma = E_1 \varepsilon_1,$$

где σ – напряжение, ε_1 – удельное удлинение упругого элемента, E_1 – модуль Юнга.

Напряжение в вязком элементе η_1 изменяется в соответствии с законом Ньютона

$$\sigma = \eta_1 \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t},$$

²См., например, «Физический энциклопедический словарь». М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1965, т. 4, стр. 435, термин «Реология».

где η_1 – коэффициент вязкости, t – продолжительность деформации, ε – удельное удлинение вязкого элемента.

Напряжение в модели Кельвина–Фогта равняется сумме напряжений в параллельно соединенных вязком и упругом элементах:

$$\sigma = E_2\varepsilon + \eta_2 \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t},$$

где E_2 – модуль Юнга на упругом элементе в модели Кельвина–Фогта; η_2 – модуль вязкости; ε – удельное удлинение на модели Кельвина–Фогта

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-t/\tau}\right).$$

Здесь $\tau = \eta_2/E_2$ – время релаксации. Именно этот параметр выражает инерционность механической системы и показывает, насколько изменение длины запаздывает по отношению к изменениям напряжения.

Длина каждого лоскута складывается из трех составляющих

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \left[\frac{\sigma}{E_2} \frac{\sigma}{E_1} + \left(1 - e^{-t/\tau}\right) \right] + \frac{\sigma}{t} \eta_1.$$

В численном эксперименте исследованы особенности реологической структуры кожи и структуры импульсного потока с учетом зависимости коэффициентов вязкости и упругости от температуры. Результаты численного эксперимента согласуются с электрофизиологическими данными и позволяют высказать предположение о реологических детерминантах параметров импульсного потока в А β -, Ад- и С-волокнах: напряжение на упругом элементе модели Фогта соответствует активности в С-волокнах, а на вязком элементе – в А-волокнах. При этом «упругий» модуль можно рассматривать как аналог поверхностного слоя кожи, а «вязкий» модуль – как аналог глубинного слоя.

Исследуя соотношение напряжения $R_{E2} = f_{E2}(\varepsilon, d\varepsilon/dt)$ в модуле $E2$ и напряжения $R_{\eta2} = f_{\eta2}(d\varepsilon/dt)$ в модуле $\eta2$ (здесь ε – удельное удлинение) на итерационной реологической модели, получаем представление об уровне возбуждения в рецептирующих терминалах А- и С-афферентных волокон кожного нерва, а значит, и о структуре интегративного импульсного потока, возникающего при раздражении кожи. Открывается возможность для сопоставления параметров активности в афферентных волокнах с реологическими параметрами, отражающими анизотропию напряжений на «упругом» и «вязком» модулях (Таблица).

Численный эксперимент показывает, что при медленном и быстром растяжении реологические реакции в вязком и упругом модулях имеют одинаковое значение базовых реологических параметров, что соответствует референтному признаку «механического» паттерна. Если «дуновение» рассматривать как резкое растяжение и сжатие, то структура возникающей механической реакции характеризуется резким увеличением напряжения $R_{\eta2}$ в вязком модуле и отсутствием изменений напряжения R_{E2} в упругом модуле, что на языке «импульсной активности» соответствует доминированию импульсного потока в А-волокнах над импульсным потоком в С-волокнах. Как раз такая структура афферентной активности и специфична для «дуновения». Под действием воздушного потока зарегистрирован высокочастотный

Связь между параметрами афферентного потока
в волокнах кожного нерва с реологическими свойствами кожи

Характеристики афферентного потока	Реологические характеристики
Уровень фоновой (спонтанной) активности	Исходное напряжение
Количество активных волокон Аβ, Аδ и С	Размеры зоны деформаций
Максимальная частота импульса	Максимальное напряжение, возникающее при деформации
Продолжительность импульсации ³	Продолжительность реологической реакции
Градиент нарастания ответа	Скорость изменения напряжения

электрический сигнал в большом количестве быстропроводящих А-волокон [17]. Используя предложенную аналогию, можно предсказать характер афферентной активности при вибрации как серии знакопеременных смещений (рис. 3). Проведенный численный эксперимент выявил, что при вибрационных воздействиях на кожу возникает высокочастотная активность в большом количестве А-волокон, продолжительность которой значительно больше, чем при смещении волосков («дуновении»). При этом в С-волокнах, активность которых изменяется в соответствии с параметром R_{E2} , можно предположить возникновение низкочастотного импульсного разряда в небольшом количестве волокон при большой скорости нарастания разряда до максимума. Это предсказание, сделанное на основе качественного анализа результатов численного эксперимента, находит подтверждение в данных электрофизиологического исследования влияния вибрации на структуру афферентной активности от совокупности рецепторов кожи. Было показано, что при низкочастотном механическом раздражении, действительно, наблюдается доминирование электрической активности в миелинизированных А-волокнах над электрической активностью в медленнопроводящих С-волокнах: виброраздражение кожи голени кошки вызывало ответ механорецепторов, иннервируемых волокнами Аβ и Аδ, на предъявление каждого стимула, немиелинизированные волокна группы С почти не участвовали в передаче сигнала [17]. Такое соответствие выводов, сделанных на основе рассматриваемой реологической модели, с объективными данными доказывает корректность принятых аналогий.

Таким образом, численный эксперимент на предложенной реологической модели позволяет восполнить звено, традиционно отсутствующее в электрофизиологических исследованиях, а именно, дает представление о реологической структуре, детерминирующей периферический сенсорный сигнал от механорецепторов кожи.

Знание информативных параметров афферентной активности и их реологических детерминант открывает замечательную возможность для расчета полного набора интегративных кодов, посылаемых механорецепторами по афферентным волокнам, и выделения классов кодовых комбинаций, соответствующих основным модальностям. Предлагаемая модель кодов в периферическом отделе кожного анализатора

³Продолжительность импульсации – продолжительность реакции рецепторов на стимул, регистрируемой как увеличение частоты импульсного тока в нервных волокнах.

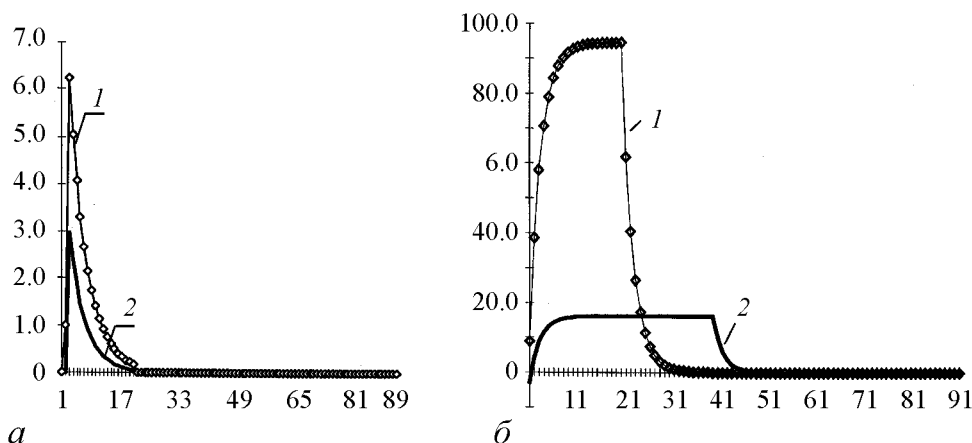


Рис. 3. Динамика напряжения в вязком элементе (а) и в упругом элементе (б) модели Кельвина-Фогта при деформации для различных значениях модуля упругости. 1 – динамика напряжения при низкой температуре, 2 – при высокой температуре. По оси абсцисс – время реакции в относительных единицах, по оси ординат – величина напряжения в относительных единицах

основана на статистически-вероятностных комбинациях параметров плотностей потоков в модальных группах нервных волокон. Общее количество допустимых кодов вычисляется по формуле:

$$N = 1 + R^{n(s-1)} + \sum_{i=1}^n nR^{(n-i)(s-1)},$$

где N – общее количество допустимых кодов; s – количество параметров, которые описывают афферентный поток по волокнам одной группы; R – количество состояний одного параметра; n – количество параллельных каналов передачи сигнала, соответствующее модальным группам волокон кожного нерва – Аβ, Ад и С.

Благодаря численному эксперименту и расчетам по приведенным формулам определена структура пространства естественных кодов, состоящих из 15 кодовых параметров: общее количество кодов – 4913; количество кодов «холода» – 320; количество кодов «прикосновения» – 384; количество кодов «дуновения» – 448; количество кодов «боли» – 384; количество кодов «тепла» – 1; количество «новых» кодов – 3376.

Таким образом, получен полный набор периферических сенсорных кодов, которые детерминированы соответствующими реологическими паттернами. Этот список может стать основой для решения главной проблемы соматосенсорного канала, а именно, для построения функциональных карт в соматосенсорной коре.

Заключение

Полученные электрофизиологические данные и результаты численных экспериментов на моделях свидетельствуют, что первичным сенсорным кодом в каждом анализаторе является динамический паттерн коллективной активности разнопороговых механорецепторов. Этот код может быть вполне адекватен динамике популяционной активности, обнаруженной в соматосенсорной коре при разномодальных

воздействиях. Таким образом, в рамках интегративного подхода к кодированию информации в кожном анализаторе определены все модули информационной системы: *источник сигнала* – трехмерная коллагеновая сеть кожи; *датчик* – распределенная в слоях кожи сеть механорецепторов; *способ передачи* – специфический паттерн активности в Аβ-, Аδ- и С-волокнах; *приемник* – нейронная сеть в топографически обусловленной зоне соматосенсорной коры.

Предлагаемая нейробиологическая модель очувствления кожи актуализирует целый набор проблем для мультидисциплинарных исследований:

- актуально создание исследовательского комплекса, способного обеспечить согласованные измерения пространственно-динамических паттернов деформаций в коже, паттернов импульсной активности в волокнах кожного нерва и коллективную динамику нейронных популяций в соматосенсорной коре при разномодальных воздействиях на кожу;
- актуальна разработка нейроморфной модели кожной чувствительности, согласованной по входным и выходным параметрам с экспериментальными данными;
- актуально создание искусственной очувствленной кожи, пригодной для медицинских и технических приложений.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 11-08-00930-а.

Библиографический список

1. Черниговский В.Н. Интероцепция / Избранные труды. СПб.: Наука, 2007. С. 3.
2. Сотников О.С. Статика и структурная кинетика живых асинаптических дендритов. СПб.: Наука, 2008. 397 с.
3. Weddell G. The multiple innervation of sensory spots in the skin // J. Anatomy. 1941. Vol. 75. P 441.
4. Минут-Сорохтина О.П. Физиология терморепции. М.: Наука, 1972. 228 с.
5. Wall P.D. Cord cells responding to touch, damage and temperature of skin // J. Neurophysiol. 1960. Vol. 23. P. 197.
6. Jarvilehto T., Hamalainen H. Touch and thermal sensations: Psychophysical observations and unit activity in human skin nerves / Sensory Functions of the Skin of human. Proceeding of the Second International Symposium on Skin Sens. Plenum Press, 1979. P. 279.
7. Mouraux A., Plaghki L. Cortical interactions and integration of nociceptive and non-nociceptive somatosensory inputs in humans // Neurosci. 2007. Vol. 150, № 1. P. 72.
8. Gardner E.P., Palmer C.I., Hamalainen H.A., Warren S. Simulation of motion on the skin. V. Effect of stimulus temporal frequency on the representation of moving bar patterns in primary somatosensory cortex of monkeys // J. of Neurophysiol. 1992. Vol. 67. P. 37.
9. Lumpkin E.A., Michael J. Mechanisms of sensory transduction in the skin // Nature. 2007. Vol. 445, № 7130. P. 858.

10. *Дуглас У., Риче Дж.* Чувствительные функции безмякотных афферентных волокон нерва кожи / Нервные механизмы боли и зуда. М.: Мир, 1962. С. 39.
11. *Catton W.T., Petoe N.* Mechanoreceptor adaptation: Experimental tests of the validity of the visco-elastic model theory // J. Physiol. (L.). 1965. Vol. 179, № 1. P. 45.
12. *Catton W.T.* A comparison of the responses of frog skin receptors to mechanical and electrical stimulation // J. Physiol. L. 1966. Vol. 187, № 1. P. 22.
13. *Catton W.T.* Mechanoreceptor function // Physiol. Rev. 1970. Vol. 50, № 3. P. 298.
14. *Catton W.T., Petoe N.* A visco-elastic theory of mechanoreceptor adaptation // J. Physiol. L. 1966. Vol. 187, № 1. P. 35.
15. *Зевеке А.В.* Деформация коллагена кожи при температурном воздействии // Физиол. ж. СССР. 1974. Т. 60, № 11. С. 1740.
16. *Зевеке А.В.* К механизму возбуждения рецепторов кожи при температурном раздражении // Физиол. ж. СССР. 1976. Т. 62, № 1. С. 91.
17. *Зевеке А.В.* Кодирование сенсорной информации в периферическом отделе кожного анализатора. Автореферат дисс... докт. биол. наук. Минск, 1991. 58 с.
18. *Зевеке А.В.* О теории кожной чувствительности // Сенс. сист. 2004. Т. 18, № 1. С. 21.
19. *Зевеке А.В., Антонец В.А., Малышева Г.И., Полевая С.А.* Возможность синтеза дополнительного сенсорного канала в системе «человек–машина» // Сенс. сист. 1992. Т. 6, № 4. С. 100.
20. *Зевеке А.В., Антонец В.А., Малышева Г.И., Полевая С.А., Ефес Е.Д.* Механизм формирования температурных ощущений / Тез. докл. XVII Съезда физиологов России. Ростов-на-Дону, 1998. С. 291.
21. *Зевеке А.В., Гладышева О.С.* Изменение спектра частоты в миелинизированных афферентных волокнах Аδ при раздражении механорецепторов кожи // ДАН СССР. 1969. № 189. С. 1150.
22. *Зевеке А.В., Ефес Е.Д.* Характеристика афферентной импульсации рецепторов кожи при действии потока воздуха // Бюлл. exper. биол. мед. 1976, № 9. С. 1030.
23. *Зевеке А.В., Малышева Г.И.* Исследование импульсных потоков от рецепторов кожи при ее охлаждении // Нейрофизиол. 1980. Т. 12, № 4. С. 413.
24. *Зевеке А.В., Маругин А.В., Полевая С.А.* Исследование кровотока методом флуориметрии / Новые технологии в науке и практике: Тез. Международн. конф. Н. Новгород, 1998. С. 124.
25. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Иллюзия тепла при охлаждении кожи человека // Рос. физиол. ж. им. И.М. Сеченова. 1996. Т. 82, № 2. С. 106.
26. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Исследование кодирования температурной информации в периферическом отделе кожного анализатора / Тез. докл. II Съезда биофизиков России. М. 1999. Т. 3. С. 995.
27. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Исследование системы интегративных кодов в периферическом отделе кожного анализатора / Проблемы нейрокибернетики: Матер. 13-й Международн. конф. по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону, 2002. С. 94.

28. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Кодирование иллюзии тепла при охлаждении кожи / Проблемы нейрокибернетики: Матер. 11-й Международн. конф. по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону, 1995. С. 105.
29. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Модели кодов сенсорной информации периферического отдела кожного анализатора // Сенс. сист. 1992. Т. 6, № 4. С. 79.
30. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Роль реологических свойств кожи в формировании температурных ощущений // Сенс. сист. 2000. Т. 14, № 3. С. 34.
31. *Зевеке А.В., Полевая С.А., Антонец В.А.* Исследование пространства сенсорных кодов с точки зрения оценки возможности синтеза дополнительного сенсорного канала в системе «человек–машина» // Известия вузов. Радиофизика. 1994. Т. 37, № 9. С. 1156.
32. *Зевеке А.В., Полевая С.А., Антонец В.А., Мальшева Г.И.* Об избыточности пространства сенсорных кодов кожного анализатора // Сенс. сист. 1992. Т. 6, № 4. С. 97.
33. *Зевеке А.В., Хаяутин В.М.* Определение частот афферентных импульсов в целом нервном стволе // Физиол. ж. СССР. 1966. Т. 52, № 3. С. 258.
34. *Зевеке А.В., Шапошников В.Л.* Существуют ли специализированные холодовые рецепторы кожи? // Бюлл. экспер. биол. мед. 1979. № 10. С. 398.
35. *Камолых И.С., Полевая С.А., Воденев В.А.* Влияние температурного состояния кожи на структуру афферентной активности в волокнах кожного нерва // Вестн. ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород, Изд-во ННГУ. 2007. № 4. С. 75.
36. *Барина О.В., Зевеке А.В., Мальшева Г.И.* Фоновая активность рецепторов с миелиновыми волокнами волосистой кожи кошки // Сенсорные системы. 2000. Т. 14, № 3. С. 185.
37. *Гладышева О.С.* Влияние температуры на спектры частот в миелинизированных афферентных Аβ волокнах при раздражении механорецепторов кожи // Бюлл. экспер. биол. мед. 1970, № 12. С. 13.
38. *Мальшева Г.И.* Ноцицептивные реакции на действие механических раздражителей. // Бюлл. экспер. биол. мед. 1974. Т. 77. С. 11.
39. *Мальшева Г.И., Зевеке А.В.* Некоторые характеристики афферентного потока при повреждающих воздействиях на кожу // Нейрофизиол. 1976. № 9. С. 168.
40. *Мальшева Г.И., Зевеке А.В., Голубев В.Н.* О периферическом коде температурной информации // Сенс. сист. 1993. Т. 7, № 1. С. 13.
41. *Минут-Сорохтина О.П.* Двойственность периферической холодовой рецепции // Физиол. ж. СССР. 1974. Т. 56, № 6. С. 886.
42. *Полевая С.А.* Интегративные принципы кодирования и распознавания сенсорной информации. Особенности осознания световых и звуковых сигналов в стрессовой ситуации // Вестн. НГУ. 2008. Т. 2. С. 106.
43. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Антонец В.А.* Алгоритм кодирования и распознавания температурной информации в кожном анализаторе / Научная сессия МИФИ-2004. VI Всероссийск. научно-техническая конф. «Нейроинформатика – 2004»: Сб. научн. тр. / М.: МИФИ. 2004. Ч. 2. С. 115.
44. *Полевая С.А., Еремин Е.В., Зевеке А.В.* Алгоритм формирования температурных ощущений // Сенс. сист. 2001. Т. 15, № 3. С. 229.

45. *Гаврилов Л.Р., Гершуни Г.В., Ильинский О.Б., Сиротюк М.Г., Цирульников Е.М., Щеканов Е.Е.* Действие фокусированного ультразвука на поверхностные и глубинные структуры руки человека / Тканевая рецепция. Л.: Наука, 1974. С. 33.
46. *Гаврилов Л.Р., Цирульников Е.М.* Фокусированный ультразвук в физиологии и медицине. Л.: Наука, 1980. 179 с.
47. *Цирульников Е.М.* Постстимульная кожная боль // Ж. эволюц. биохим. физиол. 1990. № 2. С. 267.
48. *Цирульников Е.М.* О специализированном аппарате температурной рецепции у человека // Ж. эволюц. биохим. физиол. 1975. Т. 11, № 5. С. 479.
49. *Енин А.Д., Цирульников Е.М., Потехина И.Л., Гаврилов Л.Р.* Температурная зависимость рецепторных структур и температурная рецепция // Ж. эволюц. биохим. физиол. 1992. Т. 28, № 3. С. 353.
50. *Енин А.Д., Цирульников Е.М., Потехина И.Л.* Функциональные характеристики рецепторных структур кожи животных и человека. // Ж. эволюц. биохим. физиол. 1989. Т. 25, № 4. С. 412.
51. *Green B.G.* Thermo-tactile Interaction: Effects of touch on thermal localization // Sensory function of the skin of Humans / Eds. D.R. Kenshalo. N.Y.-London: Plenum press, 1979. P. 407.
52. *Регирер С.А., Руткевич И.М., Усик П.И.* Механика полимеров. М., 1975. С. 585.
53. *Соколов В.Е.* Кожный покров млекопитающих. М.: Наука, 1973. 488 с.
54. *Федорова В.Н., Маевский Е.И., Маевская М.Е., Обрубов С.А., Фаустова Е.Е.* Механические модели, имитирующие некоторые свойства кожи / Тез. III Всероссийск. конф. по биомеханике. Нижний Новгород, 1996. С. 82.
55. *Chambers M., Iggo A.* Slowly-adapting cutaneous mechanoreceptors // J. Physiol. L. 1968. Vol.198, № 2. P. 80.
56. *Мальшева Г.И., Зевеке А.В.* Некоторые характеристики афферентного потока при повреждающих воздействиях на кожу // Нейрофизиол. 1976, № 9. С. 168.
57. *Иванов К.П.* Основы энергетики организма. Л.: Наука, 1990. С. 214.
58. *Perl N.R.* Is pain a specific sensation? // J. Psych. Res. 1971. Vol. 8. P. 273.
59. *Хаяутин В.М.* Сосудодвигательные рефлекссы. М.: Наука, 1964. 376 с.
60. *Зевеке А.В., Полевая С.А.* Роль реологических свойств кожи в формировании температурных ощущений // Сенсорные системы. 2000. Т. 14, № 3. С. 34.
61. *Гуль В.Е., Кулезнев В.Н.* Структура и механические свойства полимеров. М.: Вышш. шк., 1966. 316 с.
62. *Воронков В.Н.* Исследование механических свойств кожи человека в норме и при патологических состояниях. Дисс... канд. биол. наук. Москва, 1993. 159 с.
63. *Tapper D.N.* Input-output relationships of a skin tactile sensory unit of the cat // Trans. N.-Y. Acad. Sci. 1964. Vol. 26. P. 697.
64. *Ильинский О.Б.* Физиология механорецепторов / Физиология сенсорных систем. Л.: Наука, 1975. Т. 3. 560 с.
65. *Сомьен Дж.* Кодирование сенсорной информации в нервной системе млекопитающих. М.: Мир, 1975. 416 с.

SKIN SENSITIVITY: SPECIFICITY OF THE DYNAMICS OF SPATIAL-TEMPORAL PATTERNS OF ACTIVITY OF MECHANORECEPTORS VERSUS «LABELED LINES»

A.V. Zeveke, S.A. Polevaya

Through the development of methods for detecting the dynamics of spatial-temporal patterns of activity in the nervous system fundamental evidences obtained, that the sensory code have integrative nature and theories of localisation of function are inconsistent. The paper presents a review of electrophysiological data and models, indicating the integrative mechanisms of information coding in the peripheral skin analyzer of humans and animals. We give the description of specific structures of a pulsed flow in cutaneous nerve fibers to the five major modalities: «touch», «vibration», «breath», «cold», «pain», «warm». Based on neurobiological research and mathematical modeling we propose a new framework for organizing sensory channel associated with the skin.

Keywords: Skin mechanoreceptors, sensory codes, collective dynamics, model.



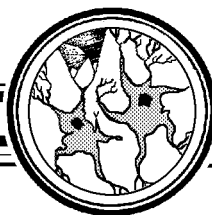
Зевеке Александр Васильевич – родился в Горьком (1923), окончил Горьковский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1951). После окончания ГГУ работал руководителем отдела биокibernетики НИИ прикладной математики и кибернетики ГГУ. Защитил диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук в Институте нормальной и патологической физиологии АМН (1951) и доктора биологических наук в Институте физиологии Белорусской Академии Наук (1992) в области физиологии сенсорных систем. Является основоположником теории интегративных сенсорных кодов в кожном анализаторе. Опубликовал 145 работ, посвященных периферическим механизмам кожной рецепции и роли коллагена кожи в формировании сенсорного сигнала.

603005 Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1
Нижегородская государственная медицинская академия
E-mail: zeveke@mail.ru



Полевая Софья Александровна – родилась в Горьком (1964), окончила Горьковский государственный университет в им. Н.И. Лобачевского ((1986). После окончания ГГУ работает в Нижегородской государственной академии заведующим отделом нейрофизиологии и экспериментального моделирования. Защитила диссертации на соискание ученой степени кандидата биологических наук в ННГУ (1998) и доктора биологических наук в Институте экспериментальной и теоретической биофизики РАН (2009) в области когнитивной биофизики. Опубликовала 114 работ, посвященных алгоритмам кодирования и распознавания сенсорной информации, а также информационным технологиям для исследования когнитивных функций.

603005 Нижний Новгород, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1
Нижегородская государственная медицинская академия
E-mail: vostokov@appl.sci-nnov.ru



АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СИГНАЛАМИ О РАССОГЛАСОВАНИИ В КОГНИТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ: РОЛЬ ЭНДОГЕННОЙ ОПИОИДНОЙ СИСТЕМЫ

С.Б. Парин, М.А. Чернова, С.А. Полевая

В работе рассматривается ставшая классической циклическая схема построения моделей когнитивных процессов.

На основе нейробиологических данных указывается на необходимость введения в модель специального механизма размыкания циклов, происходящего на этапе, предшествующем стадии принятия решения. Рассматривается один из главных нейрхимических кандидатов на роль такого «размыкателя»: эндогенная опиоидная система, которая обеспечивает подавление сигналов о рассогласовании между реальными и предсказанными (желаемыми, необходимыми) параметрами системы.

Ключевые слова: Циклы обработки информации, предсказание, измерение, оценка рассогласования, размыкание циклов, эндогенная опиоидная система.

Введение

Одним из основных положений современной когнитивной науки является представление о ключевой роли разномасштабных циклов: предсказание – измерение – оценка рассогласований, которые поддерживаются как отрицательными, так и опережающими обратными связями. Этот сугубо кибернетический, информационный по сути, принцип имеет множество приложений в живых системах – начиная от управления молекулярными каскадами и заканчивая высшими когнитивными процессами. Закономерно, что в основу современных математических моделей сознания положена циклическая структура: цикл информационного синтеза А. Иваницкого, цикл самоидентификации В. Сергина, re-entering Д. Эдельмана, распознающая ячейка В. Яхно, цикл К. Кавамуры, цикл Д. Бруннера, эфферентная копия по А. Хольсту и т.д. [1]. Некоторые из этих моделей (например, цикл А.М. Иваницкого) надежно верифицированы в экспериментах. По-видимому, отправным пунктом этого подхода необходимо признать теорию функциональной системы П.К. Анохина (рис. 1). Конечно, идеи о наличии отрицательных обратных связей в живых информационных системах многократно высказывались и до Анохина (К. Бернар, А. Ухтомский,

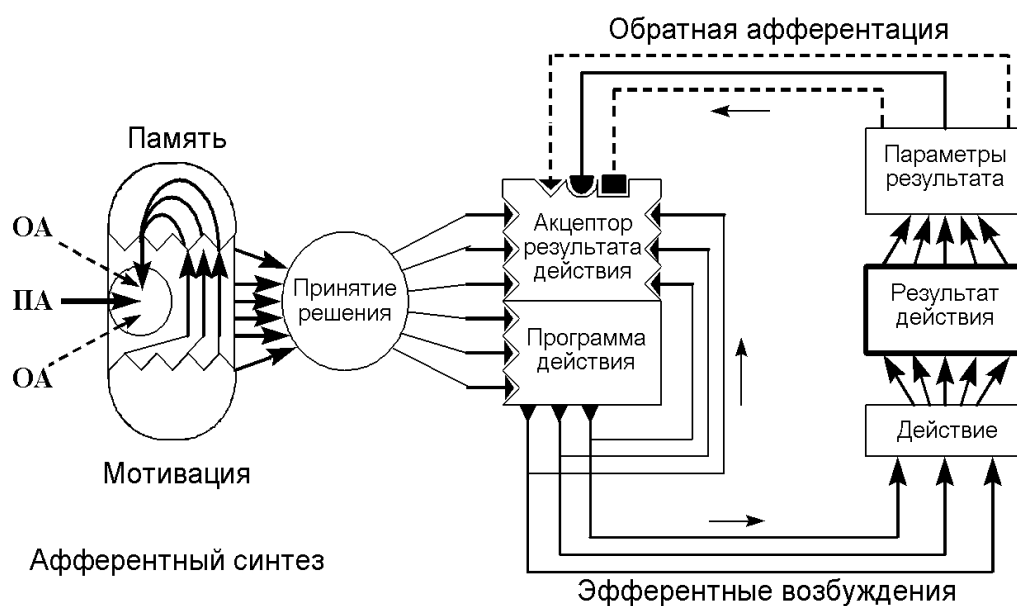


Рис. 1. Функциональная система П.К. Анохина [2]

У. Кеннон и др.), но именно ему удалось максимально четко выразить цикличность обработки информации на разных этапах и уровнях управления в организме.

В функциональной системе Анохина можно увидеть как минимум пять циклических информационных процессов:

- цикл афферентного синтеза, включающий обработку (сопоставление) текущей и контекстной информации, информации о доминирующей мотивации и гомологичной информации, извлекаемой из памяти;
- короткая петля «программа действия – акцептор результата действия»;
- наиболее очевидный цикл оценки адекватности параметров результата действия акцептору результата;
- длинная петля обратной афферентации;
- многократно обсуждавшийся П.К. Анохиным, но так и не нашедший графического воплощения короткий цикл на стадии принятия решения [2].

Обязательным компонентом каждого цикла является оценка сигнала о рассогласовании. Оценка степени рассогласования («невязки» – по [3]) между желаемым результатом и полученным, между активированной энграммой и реальным сигналом и т.д. – вот, по существу, «двигатель» и физиологической, и психологической активности субъекта.

В последние годы появились данные, позволяющие поставить очень существенный вопрос: существуют ли механизмы, обеспечивающие контроль оценки рассогласования в циклических модулях? Почему, например, в измененных состояниях сознания реальное состояние систем организма (включая и когнитивный, и эмоциональный, и энергетический, и моторный уровни) вступает в очевидное противоречие с его оценкой, что зачастую приводит к непоправимым последствиям? – На наш взгляд, сегодня мы имеем возможность достаточно уверенно предложить биолого-правдоподобное объяснение.

Почти 40 лет назад была открыта эндогенная опиоидная система (ЭОС), образованная опиоидпродуцирующими клетками (нейронами и эндокринными клетками) и опиатными рецепторами [4–8]. Свое название эта система и ее компоненты получили из-за того, что вырабатываемые в нашем организме опиоидные пептиды (или опиоиды – эндорфины, энкефалины, динарфины и мн.др.) по своим физиологическим свойствам аналогичны наркотическим анальгетикам, то есть опиатам: опию, морфину, фентанилу, промедолу, героину и т.д. Объясняется это тем, что эндогенные опиоидные пептиды, химически существенно отличаясь от опиатных алкалоидов, тем не менее связываются с теми же мембранными рецепторами («опиатными»), что и наркотики. Долгое время эта система рассматривалась исключительно как антиноцицептивная, то есть система эндогенного подавления боли. Однако наши данные и результаты экспериментов в сотнях лабораторий мира позволяют усомниться в справедливости этого положения. Ключевым здесь, по-видимому, является вопрос о феномене боли. Удивительно, но мало кто задумывался о том, что в природе не существует такой физической реальности, как боль. Есть свет, звук, давление, вибрация и др., то есть конкретные физические (или химические, в случаях обоняния и вкуса) факторы, степень воздействия которых на субъекта может быть объективно (то есть независимо от присутствия и состояния субъекта) измерена и выражена во вполне конкретных размерных единицах. Все попытки объективного измерения боли не приводили и не могли привести к успеху, потому что в природе не существует ни химической, ни физической реальности «боль». Что же тогда есть? – Распространенный ответ: это наш личный (личностный) субъективный образ, отражающий повреждение (наших клеток, тканей и т.д.). Это сигнал тревоги, признак неблагополучия. На наш взгляд, это тоже мало что объясняет. Далеко не случайно в современных западных руководствах по физиологии боль принято «выносить за скобки» при обсуждении сенсорных систем (наряду с голодом, жаждой и т.д.), так как этот феномен не имеет ни специфического рецепторного аппарата, ни специфических периферических волокон [9]. Необходимо напомнить, что в природе не существует периферических анальгетиков, есть только анестетики. Напомним также, что при периферической анестезии (например, препаратами новокаинового ряда) подавляются все виды чувствительности и моторики, потому что мишенью для этих веществ является весь нервный ствол, без особой специфики, связанной с «болевым» сигналом. Когда же речь идет об анальгезии, то есть подавлении исключительно боли, мы вынуждены «обращаться в высшие инстанции» – с помощью ненаркотических (типичный пример – аналгин) или наркотических (опиатных) анальгетиков воздействовать на центральные механизмы обработки сигнала. Почему же нет способов избирательного подавления болевого потока на периферии, это возможно только на центральном уровне? – Потому что боль является типичным примером сигнала о рассогласовании между «образом тела» в норме и сигналом об альтерации какого-то участка этого тела; и оценка этого рассогласования возможна только на центральном уровне, где уже имеется и пространственно-временной паттерн сигнала о повреждении («код боли»), и соматотопический «образ тела».

Какова же в таком случае роль эндогенной опиоидной системы? – Для ответа на этот вопрос необходимо перечислить те ее базовые свойства, которые стали известны за десятилетия, прошедшие с момента ее открытия. Кроме уже обсуждавшейся антиноцицептивной активности, ЭОС обладает стресс-лимитирующими, минимизирующими и гипобиотическими свойствами [10]. Нейроны, продуцирующие короткоцепочечные опиоидные пептиды (прежде всего, энкефалины), локализованы,

в основном, в структурах гипоталамуса и лимбической системы [11]. Их медиаторная функция, в первую очередь, заключается в пресинаптическом торможении моноаминергической передачи [12]. Длинноцепочечные опиоиды (эндорфины, динорфины и др.) в мозгу вырабатываются только одним пулом гипоталамических нейронов, а главным образом синтезируются во вне мозговых клетках (например, в гипофизе, надпочечниках, лейкоцитах и т.д.) [11]. Это позволяет относить их к другому классу информонов – к гормонам. Опиатные рецепторы, являющиеся мембранными мишенями для опиоидов, функционально гетерогенны (разные авторы выделяют 3, 5, 9 и более классов) и распределены как в структурах мозга (так же, в основном, в лимбической системе), так и на периферии [12]. Принципиальным является то, что ЭОС, во-первых, в подавляющем большинстве систем исполняет ингибирующую роль и, во-вторых, на центральном уровне сконцентрирована, прежде всего, в структурах лимбической системы. Что же она подавляет, в таком случае? – Беремся утверждать, что именно сигналы о рассогласовании в различных информационных контекстах. Приведем несколько примеров из экспериментальной практики. Чрезвычайно популярное представление о так называемых «центрах удовольствия» основывается на сугубо бытовой логике: раз животное не может оставить в покое педаль, при нажатии на которую происходит электростимуляция опиоидергических и моноаминергических структур гипоталамуса или центрального серого вещества, значит, оно получает неизъяснимое наслаждение от этой процедуры. Абсолютно игнорируется тот факт, что животное при этом отнюдь не выглядит счастливым, скорее наоборот – чрезвычайно истощенным. Возникает вопрос: в чем биологический смысл этого феномена? В формировании подкрепления бессмысленных действий? – Эволюционно – это абсурд. Рискнем предположить, что активация ЭОС, спровоцированная электрическим сигналом, временно уменьшает (гасит) сигнал о рассогласовании между параметрами желаемого результата и параметрами результата действия, имитирует достижение желаемого результата, и закрепляет энграмму действия, предшествующего электростимуляции. При восстановлении сигнала о реально существующем рассогласовании животное повторяет подкрепленное действие. Адекватная активация ЭОС (например, при выработке необходимых для жизни навыков) обеспечивает обучение, а неадекватная активация ЭОС проявляется в ошибках предсказания награды и аддикциях. Еще один пример – это хорошо известный феномен преабсорбтивного насыщения, когда во время еды мы перестаем чувствовать голод задолго до того, как первые молекулы глюкозы реально насытят изголодавшиеся клетки организма. Принятие решения о прекращении пищедобывательного поведения опережает сигналы о насыщении от глюкорецепторов, поскольку для активации ЭОС оказывается достаточно сенсорных сигналов от вкусовых рецепторов и механорецепторов желудка. В таком случае становится очевидной причина отсутствия аппетита у наркоманов: ЭОС активно гасит сигналы о рассогласовании, связанные с голодом.

Еще более очевидные примеры можно привести из области психофизиологии экстремальных состояний. Благодаря использованию математической и различных экспериментальных моделей стресса, было установлено, что ЭОС играет ключевую роль, как минимум, на двух из трех стадий этой неспецифической защитной реакции (рис. 2). На стадии тревоги медиаторный пул опиоидной системы активируется вместе с активацией симпатoadреналовой системы (САС), а на стадии истощения ЭОС доминирует и в полной мере проявляет свои гипобиотические свойства на всех уровнях регуляции [10].

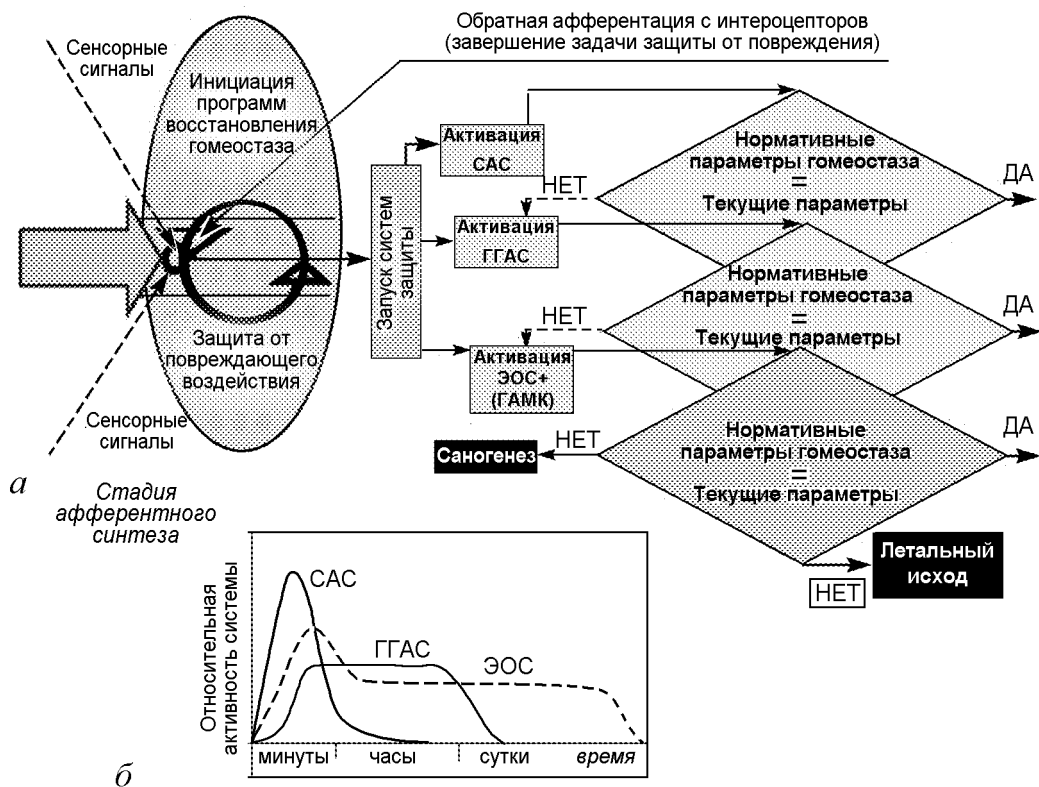


Рис. 2. Функциональная система базовых нейроэндокринных механизмов стресса и шока (а) и качественная характеристика динамики стресс-реактивных систем (б)

Распространенное заблуждение о том, что активация симпатoadреналовой системы может объяснить снижение болевой чувствительности на стадии тревоги, противоречит всем имеющимся сегодня экспериментальным данным. Хорошо известно, что избирательная активация симпатoadреналовой системы не только не снижает болевую чувствительность, но и, как правило, усиливает ее. Это противоречие преодолевается знанием о чрезвычайной активации ЭОС, происходящей параллельно с адреналовой активацией и, по сути, конкурирующей с ней. По-видимому, роль ЭОС в данном контексте заключается не только в пресинаптическом ингибировании адреналовой трансмиссии (как принято считать [12]), но и в подавлении сигналов о рассогласовании между реальными сигналами от экстерорецепторных и (в случае уже состоявшегося повреждения) интерорецепторных входов и гомологичными энграммами в когнитивном, вегетативном, моторном и эмоциональном циклах [13]. Именно поэтому боль, как сигнал о рассогласовании, на первой стадии стресса и не ощущается, и не воспринимается. Главной функцией ЭОС на этом этапе является своеобразная защита уже запущившейся стресс-реактивной программы активации симпатoadреналовой и гипоталамо-гипофизарно-адреналовой (ГГАС) систем от информационных помех.

На третьей стадии стресса, стадии истощения, ЭОС выступает уже как монополярная хозяйка информационного пространства, так как функционирует на фоне или полного (в случае симпатoadреналовой системы), или значительного (в случае гипоталамо-гипофизарно-адреналовой системы) истощения систем стрессовой акти-

вазии. Строго говоря, еще до стадии истощения были приняты решения о способе защиты и запущена на исполнение неспецифическая программа защитных действий. Возможно, цель стадии истощения – освобождение мозга от сигналов о рассогласовании, провоцирующих стресс, и остановка неспецифической чрезвычайно энергозатратной стресс-реакции. На этой стадии доминирует ЭОС, которая, исходя из своих функциональных возможностей, реализует эволюционно значительно более древний, гипобиотический защитный механизм: пассивную защиту с минимизацией энергозатрат [10]. Далеко не случайно фазы торпидности при шоке можно рассматривать как крайний вариант стрессовой стадии истощения, а использование опиатных блокаторов (наллоксона, налорфина, налтрексона и др.) является эффективным способом противошоковой терапии [14]. И вновь на этих этапах проявляется базовое свойство ЭОС: активное подавление сигналов о рассогласовании между реальными параметрами состояния и эталонными (предсказанными).

Это свойство ЭОС проявляется на всех четырех циклических уровнях: когнитивном, моторном, эмоциональном и вегетативном. Так, в экспериментах на павианах-гамадрилах [15], проведенных нами совместно с Е.В. Голановым, А.А. Фуфачевой и Г.М. Черкович, было установлено, что ЭОС участвует в фазическом регулировании ответных реакций сердечно-сосудистой системы на эмоционально-значимые стимулы. Использовалась модель условно-рефлекторного страха: вслед за звуковым сигналом (зуммером) приматам предъявлялось электрокожное раздражение. О выработке у животных висцерального оборонительного рефлекса пассивного избегания судили по значимому повышению артериального давления и частоты сердечных сокращений в ответ на звуковой сигнал по сравнению с фоном. Опытной группе животных в перивентрикулярные отделы гипоталамуса, характеризующиеся высокой плотностью опиатных рецепторов, вводился опиатный блокатор наллоксон в дозе 1.0 мг/кг, в объеме 2.0 мл. Оказалось, что у обезьян с введением наллоксона эмоциональное повышение артериального давления и учащение сердцебиений в ответ на предъявление условного звукового стимула было существенно менее значимым, чем у интактных животных (рис. 3).

Этот парадоксальный результат является серьезным аргументом в поддержку обсуждаемой гипотезы. В самом деле, если бы роль ЭОС сводилась к обезболиванию, ограничение ее активности наллоксоном должно было бы, наоборот, усилить гипертензию и тахикардию у приматов, ожидающих вслед за зуммером неизбежного болевого стимула. Однако прямо противоположный предсказанному результат экспериментов позволяет говорить о принципиально ином механизме: в процессе выработки у животных висцерального оборонительного рефлекса пассивного избегания происходит постепенное замещение двух независимых энграмм (образ предшествующего звукового сигнала и образ болевого подкрепления) единой энграммой (звук-боль). Соответственно, кардиоваскулярный ответ возникает уже не на болевой стимул, а на образ боли, хранящийся в памяти. Тогда блокада опиатных рецепторов наллоксоном, растормаживая механизмы оценки рассогласования, разобщает патогенные ассоциации и способствует независимому отображению звука и ноцицептивного сигнала. В результате этого условный сигнал перестает распознаваться как угрожающий. Сходные результаты были получены нами на мышах и крысах в экспериментах с угашением условного рефлекса активного избегания.

Еще один реальный пример из экспериментальной практики. При обследовании лиц, страдающих опиатной наркоманией, выяснилось, что по психофизическим (показатели компьютерной кампиметрии и латерометрии) и физиологическим (пока-

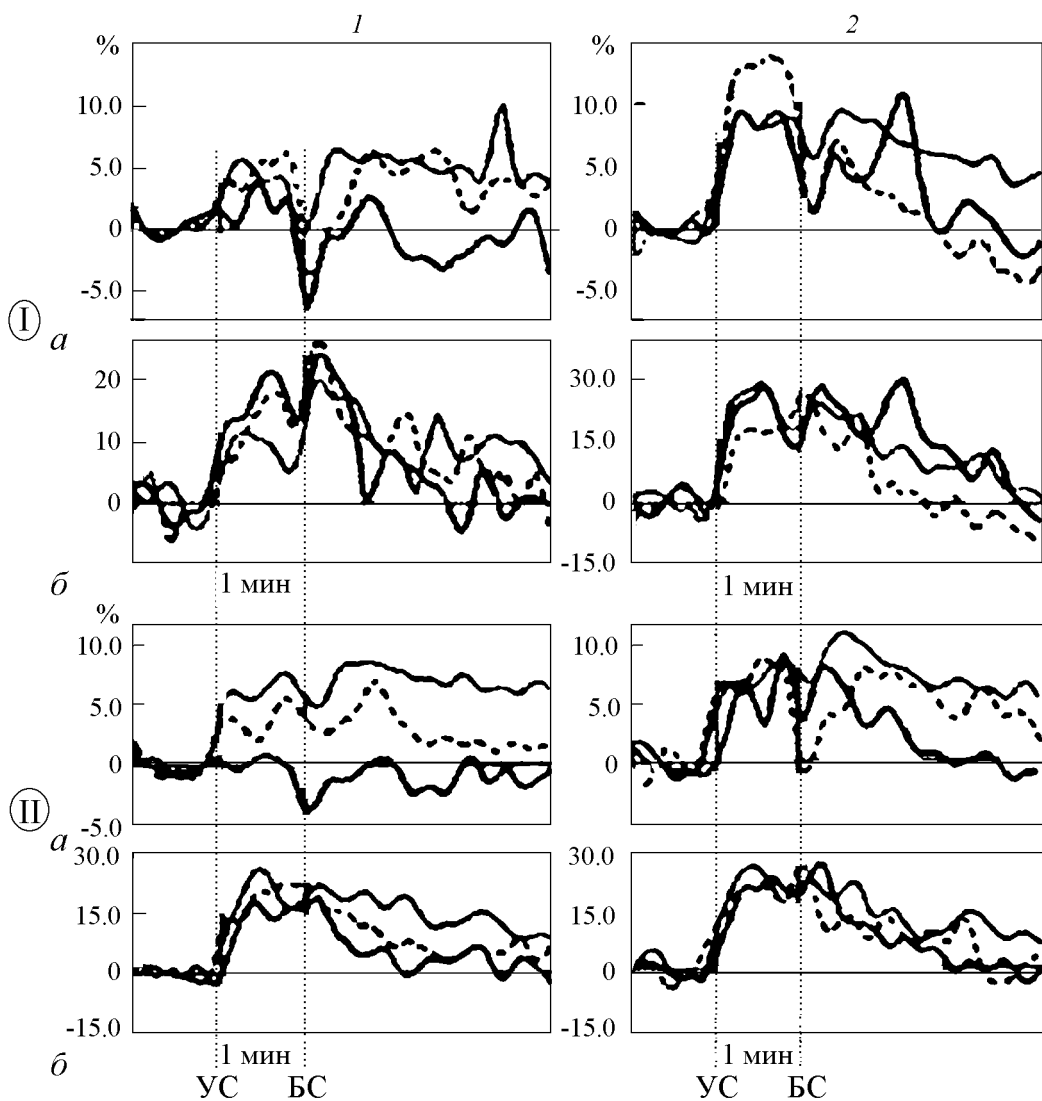


Рис. 3. Изменения ответной реакции артериального давления (а) и частоты сердечных сокращений (б) в ответ на предъявление условного сигнала (УС) и безусловного стимула (БС) после микроинъекций налоксона (1) и морфина (2) в перивентрикулярные отделы гипоталамуса (I) и ядро солитарного тракта (II). Тонкая линия – до введения препаратов, толстая – через 5 минут после введения, штриховая – через 10 минут

затели кардиоинтервалографии) параметрам они могут рассматриваться как субъекты, находящиеся на стрессовой стадии истощения (рис. 4). Кроме того, при психологическом тестировании уровня тревожности (тест Спилбергера–Ханина, опросник САН) у испытуемых был выявлен чрезвычайно низкий уровень этого субъективного параметра. При этом состояние висцеральных систем у них нужно признать катастрофическим. Это вопиющее рассогласование между реальными сигналами о неблагополучии и субъективной оценкой состояния также укладывается в представление об активном подавлении опиоидной системой оценки этой «невязки», что вполне согласуется с теоретическими представлениями о ведущей роли ЭОС в регуляции на завершающем этапе стресса: стадии истощения [10].

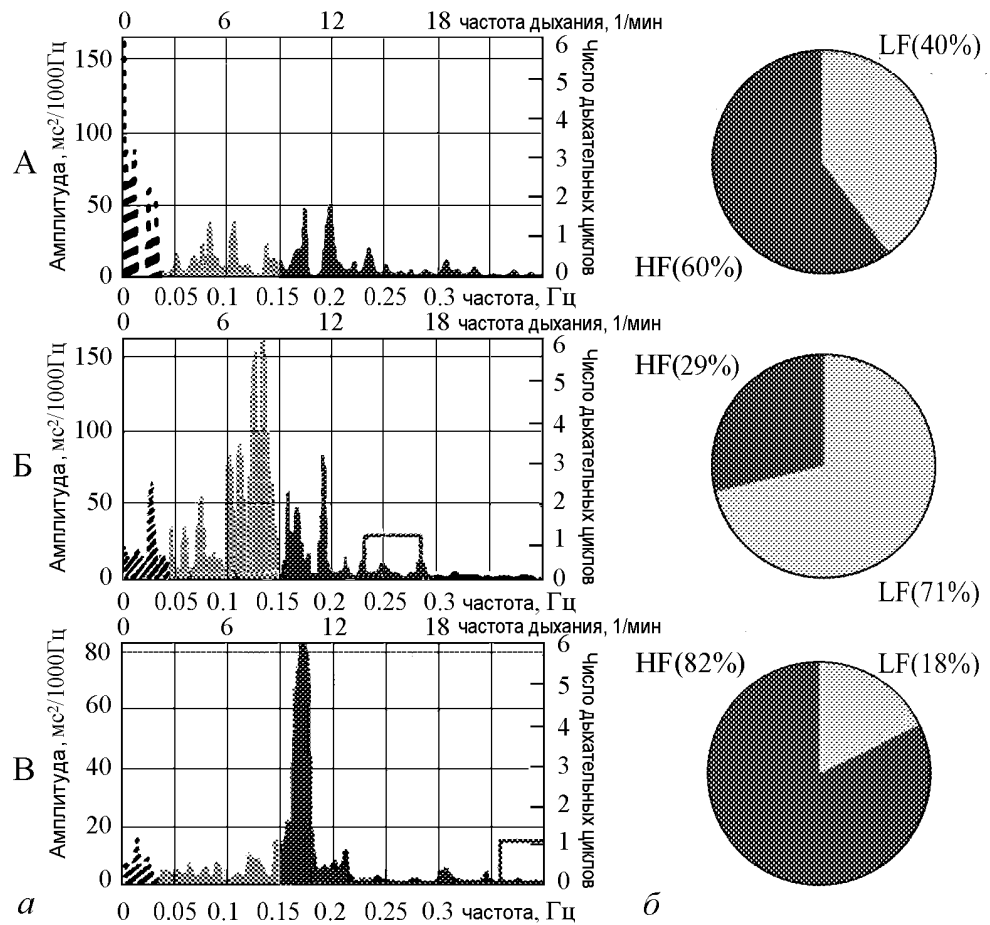


Рис. 4. Типичные примеры распределения активности регуляторных систем испытуемых по показателям кардиоинтервалографии (КИГ). А – студент в фазе релаксации (межсессионный период); Б – студент на стадии тревоги, стресса (экзамен); В – субъект, страдающий наркотической зависимостью. а – спектры вариабельности сердечного ритма (слева направо – гуморальная активность, симпатическая, парасимпатическая. б – круговые диаграммы соотношения симпатической (LF) и парасимпатической (HF) мощностей спектров

Таким образом, ЭОС играет активную роль в организации циклических нейронных модулей. Можно предположить, что активация ЭОС, подавляя сигнал о рассогласовании, является источником ошибок в распознавании, принятии решений и оценке результатов действия. Именно подавлением сигналов о рассогласовании можно объяснить разобщение вегетативных механизмов регуляции гомеостаза при экстремальных состояниях (в частности, при стрессе и шоке), сбои в моторных программах у наркоманов (тремор, дезквилибризация), эмоциональное выгорание у военнослужащих, спортсменов, педагогов, врачей и др. (например – посттравматическое стрессовое расстройство).

Хочется надеяться, что предлагаемый в данной статье подход может послужить стимулом для переосмысления некоторых устоявшихся стереотипов не только в нейробиологии и психофизиологии, но и в области математического моделирования когнитивных функций.

Работа выполнялась при частичной поддержке гранта РФФИ № 11-08-00930-а.

Библиографический список

1. *Кавамура К., Парин С.Б., Полевая С.А., Яхно В.Г.* Возможность построения симуляторов осознания сенсорных сигналов: иерархия «распознающих ячеек», нейроархитектура, психофизические данные // Научная сессия МИФИ–2008. X Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика – 2008»: Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2008. Ч. 1. С. 23.
2. *Анохин П.К.* Биология и нейрофизиология условного рефлекса. М.: Наука, 1968. 546 с.
3. *Яхно В.Г.* Динамика нейроноподобных моделей и процессы сознания // VIII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика – 2006»: Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2006. С. 88.
4. *Pert C.B., Snyder S.H.* Opiate receptor: Demonstration in nervous tissue // *Science*. 1973. Vol. 179. P. 1011.
5. *Terenius L.* Stereospecific interaction between narcotic analgesics and synaptic plasma membrane fraction of rat cerebral cortex // *Acts Pharmacol. Toxicol.* 1973. Vol. 32. P. 217.
6. *Hughes J., Smith T.W., Kosterlitz H.W., Fothergill U.A., Morgan B.A., Morris H.R.* Identification of two related pentapeptides from the brain with potent opiate agonist activity // *Nature*. 1975. Vol. 258. P. 577.
7. *Terenius L., Wahlstrom A.* Morphine-like ligand for opiate receptors in human CSF // *Life Sci.* 1975. Vol. 16. P. 1759.
8. *Teschemacher H., Opheim K.E., Cox B.M., Goldstein A.* A peptide-like substance from pituitary that acts like morphine // *Life Science*. 1975. Vol. 16. P. 1771.
9. *Schmidt R.F., Thews G.* *Physiologie des Menschen*. Berlin, Heidelberg, New-York, London, Paris, Tokyo: Springer-Verlag, 1987. 886 S.
10. *Парин С.Б.* Люди и животные в экстремальных ситуациях: нейрохимические механизмы, эволюционный аспект // *Вестник Новосибирского государственного университета*. 2008. Т. 2. Вып. 2. С. 118.
11. *Olson G.A., Olson R.D., Vaccarino A.L., Kastin A.J.* Endogenous opiates: 1997 // *Peptides*. 1998. Vol. 19, № 10. P. 1791.
12. *Bodnar R.J.* Endogenous opiates and behavior: 2007 // *Peptides*. 2008. Vol. 29, № 12. P. 2292.
13. *Яхно В.Г., Полевая С.А., Парин С.Б.* Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов // В кн.: *Когнитивные исследования*. Вып. 4. М.: Изд-во Института психологии РАН, 2010. С. 273.
14. *Голанов Е.В., Калюжный Л.В., Парин С.Б., Судаков К.В.* Способ лечения шокового состояния. Авторское свидетельство СССР № 1138165 от 08.10.84 (Приоритет от 07.05.80).
15. *Голанов Е.В., Фуфачева А.А., Черкович Г.М., Парин С.Б.* Влияние лигандов опиатных рецепторов на эмоциогенные реакции сердечно-сосудистой системы у низших приматов // *Бюллетень экспериментальной биологии и медицины*. 1987. Т. 103, № 4. С. 424.

*Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского*

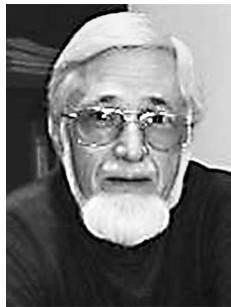
Поступила в редакцию 18.07.2011

ADAPTIVE CONTROL SIGNALS OF A MISMATCH IN COGNITIVE PROCESSES: THE ROLE OF THE ENDOGENOUS OPIOID SYSTEM

S.B. Parin, M.A. Chernova, S.A. Polevaya

In the work we consider the classic cyclic schemes for the construction of cognitive processes. Based on neurobiological data we indicate the need to introduce a special mechanism for adaptive control signals of a mismatch in cognitive processes at the stage preceding the decision point. Endogenous opioid system can be considered one of the major neurochemical candidates for such «breakers». This system provides the suppression of signals about a mismatch between current and target states of the cognitive system.

Keywords: Cycles of information processing, prediction, measurement, estimation error, breaking cycles, endogenous opioid system.



Парин Сергей Борисович – родился в Перми (1952), окончил биологический факультет Горьковского (Нижегородского) государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1979). После окончания ГГУ работает в том же университете, в настоящее время заведует лабораторией когнитивной психофизиологии факультета социальных наук. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук в Институте физиологии им. А.А. Богомольца АН УССР (Киев, 1986) и доктора биологических наук в МГУ (2011) в области физиологии. Опубликовал более 150 научных статей по физиологии экстремальных состояний, нейробиологии, когнитивной психофизиологии, математическому моделированию когнитивных процессов. Автор оригинальной концепции нейрохимических механизмов экстремальных состояний.

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: parins@mail.ru



Чернова Мария Андреевна – родилась в Горьком (Нижнем Новгороде) (1986), окончила факультет социальных наук Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского по специальности психология (2010). После окончания ННГУ работает там же лаборантом-исследователем и поступила в заочную аспирантуру ННГУ по психофизиологии (2011). Опубликовала 3 печатные работы в области психофизиологии аддикций.

603950 Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: risya_nn@mail.ru

Авторские сведения Полевой С.А. см. на стр. 64.



СУБЪЕКТИВНАЯ ОЦЕНКА СЕМАНТИЧЕСКИ РАЗНОРОДНЫХ ОБЪЕКТОВ ПРИ ТРАНЗАКЦИЯХ ОБМЕНА

В.А. Антонец, И.В. Левчук

Работа посвящена количественному моделированию закономерностей субъективного сопоставления человеком значимости разнородных материальных и ментальных объектов, представляющих для него значимую ценность. Предполагается, что каждый из них воспринимается человеком как сложный семантический стимул, характеризующийся субъективной значимостью и конечным набором принимаемых во внимание признаков. Это предположение позволяет обобщить созданную нами ранее количественную модель, связывающую субъективную оценку человеком качества товара, характеризующегося конечным набором разнородных признаков, с ценой, которую он готов заплатить за этот товар. Тем самым, удастся построить математическую модель субъективной интегральной оценки и сопоставления имеющихся и необходимых субъекту ресурсов и ценностей при принятии решений об их приобретении и/или обмене.

Ключевые слова: Интуитивное мышление, субъективная оценка значимости, семантический дифференциал, сила ощущения и величина чувственного стимула.

Введение

В обычной повседневной практике человек постоянно решает задачи оценки, сопоставления и выбора объектов, характеризующихся целым набором значимых свойств. К такому типу задач относится и выбор товаров из ограниченного ассортимента, при котором оценивается их качество и стоимость. В работах [1,2] нами была продемонстрирована возможность количественного описания механизма субъективного оценивания объектов. Построенная модель была применена для описания того, как происходит субъективное интегральное оценивание качества товара и приемлемой для этого качества цены. Однако далеко не всегда за приобретение какого-либо объекта приходится расплачиваться только деньгами. Человек может захотеть или быть вынужденным потратить и другие имеющиеся у него ресурсы и ценности (например, время, усилия, здоровье, связи) или отказаться от чего-либо значимого (например, от интересной поездки, от любимой вещи). В связи с этим возникает вопрос о моделировании субъективной интегральной оценки совокупностей имеющихся и необходимых субъекту ресурсов и ценностей при принятии решений об их приобретении и/или обмене.

В настоящее время механизмы интуитивных оценок и принятия решений на их основе изучают как систему умозаключений, моделирование которой осуществляют на сугубо качественном уровне. Задача построения количественных моделей субъективного восприятия человеком сложных объектов представляется важной, является новой и малоисследованной, а поэтому вызывает значительный научный интерес.

1. Принципы субъективного оценивания сложных объектов

Долгое время решать задачи такого типа пытались исключительно на экономических примерах. Так, в 1854 году немецким экономистом Германом Генрихом Госсеном была сделана попытка количественного описания логики принятия экономических решений. Он сформулировал два тезиса, известные как «законы Госсена» [3], которые представляют собой формализованное описание потребительской логики. При этом Госсен полагал, что поведение покупателя является исключительно рациональным и направленным на получение максимальной пользы. Такое представление не столько «не совсем соответствует действительности», сколько едва ли пригодно для построения теории, которую можно проверить экспериментально на основе измерений. Фундаментальная причина этого в том, что сами понятия «пользы» и «полезности» являются антропоцентрическими и, следовательно, субъективными. Разнообразие ландшафтных и социально-бытовых условий существования людей так велико, что у них не бывает единого мнения ни по одному поводу, включая ценность земной жизни. Что уж говорить о товаре! Даже если оценку его полезности делают независимые эксперты, они ориентируются не на «человека или людей вообще», а на их определенную выборку – сегмент. В результате мы имеем мнение экспертов о группе покупателей. Обыкновенный же покупатель, безусловно, меряет все на себя, а мнение экспертов, в лучшем случае, учитывает. Таким образом, у количественных теорий, основанных на оценках «объективных незаинтересованных экспертов», есть тот недостаток, что они не поддаются количественной проверке, поскольку сама возможность измерений в них не заложена.

Поведение заинтересованного покупателя, безусловно, субъективно и, как показали многочисленные психологические исследования, в значительной степени иррационально. Тем не менее оно объективно наблюдаемо, например, с помощью опросов, тестов, изучения чеков оплаты покупок и иных способов. Это дает шанс на измерение и последующее теоретическое обобщение объективных количественных характеристик покупательского поведения.

Американский психолог Д. Канеман¹ продемонстрировал, что вопреки распространенному представлению о рациональном рассудочном характере принятия человеком экономических решений², на основе которого построено множество экономических моделей, интуитивные экономические решения не являются рациональными [4]. Но, как уже отмечено выше, это не означает, что система принятия иррациональных решений не поддается количественному описанию.

¹Д. Канеман – лауреат Нобелевской премии 2002 г. по экономике за «интегрированное воздействие психологии на экономическую науку, в особенности в том, что касается человеческих суждений и принятия решений в условиях неопределенности».

²Такие представления Канеман охарактеризовал как ошибку Бернулли – того самого знаменитого Бернулли, которому принадлежит один из фундаментальных законов гидродинамики. В 1738 году Д. Бернулли рассмотрел задачу о перевозке на корабле пряностей из Амстердама в Санкт-Петербург, где впервые использовал понятие ожидаемой полезности, чем положил начало долгие годы сохранявшемуся исключительно рационалистическому подходу к анализу экономического выбора.

Результаты, полученные Д. Канеманом и его коллегами, показывают, что большинство принимаемых человеком решений являются интуитивными, а механизмы их принятия схожи с механизмами чувственного восприятия. При этом из психологии известно, что закономерности чувственного восприятия удается исследовать и описать количественно [5,6]. Так, на примере стимулов большинства модальностей было показано, что связь силы ощущения с величиной стимула, вызвавшего это ощущение, может быть описана количественно обобщенным законом Вебера–Фехнера – законом Стивенса [5], который в дифференциальной форме представлен соотношением

$$\frac{\Delta S}{S} = k \frac{\Delta R}{R}, \quad (1)$$

где ΔS – субъективная оценка величины изменения силы ощущения S ; ΔR – изменение величины стимула R , вызвавшее изменение силы ощущения ΔS ; $k > 0$ – константа, зависящая от модальности ощущения.

В интегральной форме (1) принимает вид

$$\frac{S}{S_0} = \left(\frac{R}{R_0} \right)^k, \quad (2)$$

где S и S_0 – сопоставляемые субъективные силы ощущения, возникающие при действии стимулов R и R_0 , соответственно.

Стивенсом экспериментально показана также [6] способность людей к сопоставлению силы ощущений, вызываемых стимулами различающихся модальностей, то есть стимулами разной физической природы. В частности, человек способен определить, одинаковы ли пропорции яркости двух источников света и громкости двух источников звука.

В работе [1] мы расширили представления Д. Канемана о сходстве интуитивного мышления и чувственного восприятия до гипотезы о применимости степенного закона Стивенса для количественного описания субъективного восприятия семантических стимулов. Это позволило записать связь между субъективно оцениваемым качеством товара q , интерпретируемым как стимул, и его ценой c , интерпретируемой как реакция на стимул, в виде

$$\left(\frac{q}{q_0} \right)^{-k} = \left(\frac{c}{c_0} \right). \quad (3)$$

Параметры q_0 и c_0 определили из следующих соображений. Пусть c_0 это максимальная цена p_{\max} , которую покупатель из некоторых субъективных соображений (оценка остроты нужды, удовлетворяемой товаром, представление о предельной разумной цене и т.п.) готов потратить на приобретение товара данного назначения. И пусть p – его субъективная оценка стоимости товара, имеющего качество q . Тогда $c_0 = p_{\max}$, а $c = p_{\max} - p$. Для каждого покупателя существует пороговое качество продукта $q = q_{\min}$, до достижения которого он не возьмет товар и задаром, поскольку такой товар не пригоден для удовлетворения имеющейся у него нужды или реализации имеющейся у него потребности. В этом случае $p = 0$ и, следовательно, $q_0 = q_{\min}$. Тогда выражение (3) переходит в (4)

$$p = p_{\max} \cdot \left[1 - \left(\frac{q}{q_{\min}} \right)^{-k} \right], \quad (4)$$

где p – цена товара, q – интегральная оценка его свойств, $k > 0$ – константа.

Полученная количественная закономерность имеет вид известной кривой Парето и отражает субъективное представление покупателя о приемлемой цене и соответствующем качестве рассматриваемого товара.

В приведенной модели рассмотрен случай, когда стимулом для покупателя являлась субъективная интегральная оценка качества товара, а реакция на этот стимул выражалась в деньгах, которые он готов заплатить за этот продукт. Но, как уже было отмечено, деньги – это далеко не единственный имеющийся у покупателя ресурс (ценность).

Предположим, что любая из ценностей (любой из ресурсов), которыми располагает человек, также воспринимается как сложный семантический стимул, характеризующийся субъективной значимостью и конечным набором принимаемых во внимание признаков. По аналогии с механизмом формирования субъективной количественной оценки человеком товара рассмотрим механизм обмена ресурсами и/или ценностями между субъектами.

2. Метод семантического дифференциала – количественное описание субъективных оценок сложных объектов

Способность человека к количественному выражению своего субъективного интуитивного отношения к объекту была открыта и продемонстрирована американским психологом Ч. Осгудом [7]. Согласно его результатам, описанным в книге «The Measurement of Meaning», человек способен дать количественную оценку каждого из значимых признаков оцениваемого объекта с использованием дискретной или непрерывной биполярной шкалы, противоположные полюсы которой заданы с помощью антонимов. Например, это могут быть шкалы: «быстрый – медленный», «громкий – тихий», «привлекательный – отвратительный» и другие. Совокупность шкал, характеризующих все значимые для восприятия объекта признаки, была названа Осгудом семантическим дифференциалом.

Принципиально важно, что эти шкалы содержат нулевую точку, которая соответствует нейтральной оценке субъектом выраженности признака. Благодаря наличию нуля эти шкалы являются шкалами отношений [6], то есть позволяют по силе вызываемой ими реакции определить вес каждого объекта по отношению к некоему фундаментальному образцовому объекту.

Совокупность численных оценок оцениваемого объекта по выявленным значимым шкалам позволяет представить его как многомерный вектор в семантическом пространстве, обладающем метрикой. В результате оказывается возможным изучение взаимного расположения сравниваемых объектов в этом пространстве и измерение расстояния между ними.

В работах [1, 2] при построении модели оценки качества товара как сложного семантического объекта мы полагали, что любой товар можно представить через совокупность признаков, по которым покупатель может оценить его качество через восприятие наиболее значимых для него характеристик. Заметим, что то, что значимо для одного покупателя, может оказаться совершенно не важным для другого. Поэтому сначала необходимо сформировать перечень существенных для данного потребителя свойств товара и каждому i -му свойству в соответствии с мнением потре-

бителя назначить вес w_i . Так формируется вектор значимости характеристик товара $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_m)$, который можно отнормировать так, чтобы $\|\mathbf{w}\| = 1$. Для каждого j -го из рассматриваемых товаров, вообще говоря, величина m может иметь разное значение m_j . Затем, в соответствии с мнением потребителя, которое может быть как интуитивным, так и основанным на измерении или рассуждении, для каждого j -го продукта формируется вектор выраженности его свойств $\mathbf{v}_j = (v_1, v_2, \dots, v_m)$. Степень выраженности того или иного свойства товара по сравнению с идеальным товаром определяется с помощью шкал Осгуда, отметки на которой отражают индивидуальное мнение потребителя об оцениваемом объекте. Интегральная же оценка q_j качества j -го продукта, фигурирующая в формулах (3) и (4), является скалярным произведением векторов \mathbf{v}_j и \mathbf{w}_j

$$q_j = (\mathbf{v}_j, \mathbf{w}_j). \quad (5)$$

Предположим теперь, что у каждого человека есть свой индивидуальный набор ценностей, которые находятся в определенной иерархии. Иерархия ценностей у разных людей различна. Например, одному важнее время, а другому – деньги. Но каждый человек, согласно Ч. Осгуду, способен выстроить такую иерархию и назначить субъективную количественную оценку значимости каждой из принимаемых во внимание ценностей. Кроме того, затрачивая и/или приобретая ценности или ресурсы, мы можем количественно оценить для каждого отдельного ресурса, сколько мы потратили и/или приобрели.

Математически затрачиваемые ресурсы (ценности) R можно выразить через скалярное произведение векторов: вектора субъективной значимости имеющихся ресурсов $\mathbf{t} = (t_1, t_2, \dots, t_n)$ и вектора субъективной количественной (по Осгуду) меры затрат этих ресурсов $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_n)$. Таким образом, интегральная субъективная оценка утрачиваемых в транзакции ресурсов (ценностей) запишется в виде: $R = (\mathbf{t}, \mathbf{r})$. Интегральная оценка приобретаемых ресурсов (ценностей) также выражается в виде скалярного произведения $V = (\mathbf{t}, \mathbf{v})$, где $\mathbf{v} = (v_1, v_2, \dots, v_n)$ – вектор количественной меры приобретаемых ценностей. Следует обратить внимание на совпадение размерности всех трех векторов \mathbf{t} , \mathbf{r} и \mathbf{v} , которая определяется числом ценностей, принимаемых субъектом во внимание. Это означает, что все компоненты вектора значимости \mathbf{t} отличны от нуля, чего нельзя сказать о векторах \mathbf{r} и \mathbf{v} . Значимость и количественная мера имеющихся и затрачиваемых ресурсов или ценностей определяется с использованием шкал Ч. Осгуда и описанных выше процедур.

3. Формализованная модель субъективного сравнения семантически разнородных объектов при транзакциях обмена

Для количественного описания взаимосвязи между приобретаемыми и затрачиваемыми ресурсами, как и в случае с товаром, предположим, что восприятие семантических стимулов подчиняется закону Стивенса. Тогда, по аналогии с (2), получим соотношение (6)

$$\left(\frac{V}{V_0}\right)^{-k} = \left(\frac{R}{R_0}\right), \quad (6)$$

что эквивалентно соотношению

$$\left(\frac{\sum_i \mathbf{t}_i \mathbf{v}_i}{V_0}\right)^{-k} = \left(\frac{\sum_j \mathbf{t}_j \mathbf{r}_j}{R_0}\right). \quad (7)$$

Как и в случае с максимальной ценой, существует и максимальное значение величины $R_0 = R_{\max}$, которое субъект считает возможным израсходовать в обмен на приобретение корзины ресурсов, характеризующихся векторами \mathbf{t} и \mathbf{v} . Также, по аналогии с минимально приемлемым качеством товара q_0 , значение $V_0 = (\mathbf{t}_0, \mathbf{v}_0)$ соответствует случаю, когда субъективно воспринимаемая значимость или количественная мера предлагаемой к обмену ценности настолько мала (интегральная оценка ценности очень мала), что субъект не станет тратить на нее свои ресурсы.

С учетом введенных параметров по аналогии с переходом соотношения (3) в (4) выражение (7) примет вид

$$\sum_{j=1}^n (\mathbf{t}_j \mathbf{r}_j) = R_{\max} \left[1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n \mathbf{t}_i \mathbf{v}_i}{V_{\min}} \right)^{-k} \right]. \quad (8)$$

Здесь R_{\max} и V_{\min} являются скалярными произведениями $(\mathbf{t}, \mathbf{r}_{\max})$ и $(\mathbf{t}, \mathbf{v}_{\min})$ соответственно. При этом, вообще говоря, соотношение (8) не определяет векторы \mathbf{r}_{\max} и \mathbf{v}_{\min} однозначно. Например, если субъект считает себя хорошо осведомленным о сделанном предложении \mathbf{v}^{ask} , то он может точно определить V^{ask} , но при этом число предложенных им ответов \mathbf{r}^{bid} , имеющих с его точки зрения равную ценность, может быть больше одного, вплоть до континуума. Векторы \mathbf{r} и \mathbf{v} могут иметь нулевые компоненты. В частности, если у каждого из них лишь одна компонента отлична от нуля, то (8) возвращается в (4), то есть \mathbf{v} – это субъективно оцениваемое качество объекта, например, качество товара, а \mathbf{r} – субъективно оцениваемый расходующий ресурс, например, деньги. Заметим, что, хотя ресурсы \mathbf{r} и \mathbf{v} эквивалентны в том смысле, что они входят в состав одного и того же пакета ценностей субъекта, из формул Парето (4) и (8) следует, что при интуитивной оценке отдаваемый ресурс ценится выше, чем приобретаемый.

Рассмотрим пример, демонстрирующий различие в восприятии набора ценностей для двух субъектов, и его влияние на принятие решения при их обмене. Предположим, что субъект А обладает набором ресурсов (ценностей) R^a , а субъект В обладает своим набором – R^b . Пусть

$$\mathbf{t}_b^a, \mathbf{t}_a^a, \mathbf{v}_b^a, \mathbf{r}_a^a, \quad (9)$$

– оценки характеристик ресурсов «а» и «b», сделанные субъектом А, а

$$\mathbf{t}_b^b, \mathbf{t}_a^b, \mathbf{v}_a^b, \mathbf{r}_b^b, \quad (10)$$

– оценки характеристик ресурсов «а» и «b», сделанные субъектом В. Обмен ресурсами между субъектами А и В возможен только в том случае, если в результате обе стороны будут считать себя в выигрыше. Таким образом, для обеспечения условий

обоюдновыгодной сделки – обмена ресурсами «а» и «б» между объектами А и В, соответственно, необходимо, чтобы соблюдались два условия

$$(t_b^a, v_b^a) \geq (t_a^a, r_a^a), \quad (11)$$

$$(t_a^b, v_a^b) \geq (t_b^b, r_b^b). \quad (12)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что при обмене ресурсами обоюдновыгодные сделки возможны только между людьми, у которых оценки субъективной значимости обмениваемых объектов не совпадают. Обоюдновыгодные сделки по обмену ресурсами между субъектами, имеющими совпадающие (сходные) интересы, невозможны. Грубо говоря, обоюдновыгодные сделки возможны только между субъектами, имеющими разные интересы.

Обоюдновыгодная сделка не обязательно является справедливой, то есть такой, когда каждый из участников сделки уверен, что при попытке дальнейшего изменения условий сделки в его пользу она не могла бы состояться. Таким образом, справедливая сделка возможна только в том случае, когда стороны хорошо осведомлены о представлениях друг друга. Однако, поскольку эти представления в силу субъективности могут быть и нерациональными, то в ходе переговоров можно не только выяснить позицию партнера, но и повлиять на нее.

Для построенной модели содержательная номинация ценностей – экономическая, политическая, спортивная, религиозная, экологическая, престижная, моральная и др. – не имеет значения. Это означает, что за очевидной разницей в поведении людей, исповедующих различные «пакеты» ценностей, вес каждой из которых в каждом пакете индивидуален, могут стоять тождественные психологические механизмы. Возможно, поэтому выдающиеся люди из разных сфер деятельности часто хорошо понимают друг друга.

Библиографический список

1. Антонец В.А., Левчук И.В. Товар как семантический аттрактор // Вестник нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. 2009. № 4. С. 299.
2. Антонец А.А., Левчук И.В. Семантический аттрактор // Российская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях», 13–15 мая, ИПФ РАН, Н.Новгород, 2009. С. 16.
3. Rist C., Gide C. A History of Economic Doctrines from the Time of the Physiocrats to the Present Day. Boston: D.C. Heath, 1915.
4. Kahneman D., Frederick Sh., Representativeness Revisited, Attribute Substitution in Intuitive Judgment // Heuristics and biases: The psychology of intuitive thought/ Eds Th. Gilovich, D. Griffin, and D. Kahneman. N.Y.: Cambridge Univ. Press, 2002.
5. Stevens S.S. On the psychophysical law // Psychol. Rev., 1957.
6. Stevens S.S. Cross-modality validation of subjective scales for loudness, vibration and electric shock // J. Exp. Psychol. 1959.
7. Osgood C. E., Suci G., and Tannenbaum P., The Measurement of Meaning. University of Illinois Press, 1957.

Институт прикладной физики РАН,
Н. Новгород

Поступила в редакцию 13.07.2011

SUBJECTIVE EVALUATION OF SEMANTICALLY UNLIKE OBJECTS DURING EXCHANGE TRANSACTIONS

V.A. Antonets, I.V. Levchuk

The work is devoted to quantitative modelling of regularities in the subjective comparison of the significance of unlike material and mental objects which are of a substantial value for a man. It is assumed that each object is perceived by a man as a complex semantic stimulus characterized by subjective significance and a finite set of the features which are to be taken into account. This assumption allows generalizing the quantitative model developed by us earlier which correlates the subjective evaluation of the quality of the product characterized by a set of unlike features and the price the man is ready to pay for this product. Thus, it becomes possible to construct a mathematical model of the subjective integral evaluation and the comparison of the resources and values a man has and needs in the process of making a decision on their buying and/or exchange.

Keywords: Intuitive thinking, subjective evaluation of significance, semantic differential, intensity of perception, sensual stimulus.



Антонец Владимир Александрович – родился в г. Урень, Горьковской области (1949). Окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И.Лобачевского (1971). Работает в Институте прикладной физики РАН ведущим научным сотрудником. Одновременно возглавляет консалтинговую компанию «Нижегородское агентство наукоемких технологий», является профессором кафедры трансфера технологий ННГУ и профессором кафедры управления инновационными проектами Академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (Москва). В 1979 году получил ученую степень кандидата биологических наук по специальности «авиационная и космическая медицина», в 1993 году – ученую степень доктора физико-математических наук по специальностям «техника физического эксперимента» и «биофизика», в 2001 году – ученое звание профессора по кафедре экологии. Автор более 150 работ в области физических и психофизических измерений, биофизики и экономики высоких технологий.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: ava@nant.ru



Левчук Ирина Владимировна – родилась в г. Кстово, Нижегородской области (1984). Окончила физический факультет Нижегородского Государственного Университета им. Н.И. Лобачевского (2006), аспирант факультета управления и предпринимательства, кафедры трансфера технологий ННГУ. Опубликовано 3 статьи в ведущих рецензируемых научных журналах в области экономики.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: levchuk.irina@nant.ru



СИНХРОНИЗАЦИЯ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ В КОЛОНКАХ ЗРИТЕЛЬНОЙ КОРЫ МОЗГА

*Л.Н. Подладчикова, Р.А. Тикиджи-Хамбурьян, А.В. Тикиджи-Хамбурьян,
Н.А. Шевцова, В.А. Васильков, Е.И. Белова, И.А. Ищенко*

Представлены результаты нейрофизиологического исследования и моделирования синхронизации активности нейронов различных типов и динамики формы импульса в двух переходных состояниях бистабильности. При моделировании имитировался диапазон длительностей импульсов «быстрых» и «медленных» нейронов, зарегистрированных в эксперименте. При тестировании группы модельных элементов с различными свойствами кратковременной и долговременной динамики активности обнаружено, что степень синхронизации их активности зависит от частоты и силы входных воздействий: она максимальна при высокой частоте сверхпороговых входных сигналов. Рассматривается возможный подход к исследованию механизмов функционирования колонок и динамических операций внутри них.

Ключевые слова: Зрительная кора, колонки, «быстрые» и «медленные» клетки, бистабильность, динамика формы импульсов, синхронизация активности, нейрофизиологическое исследование и моделирование.

Введение

Несмотря на то, что наличие локальных структурно-функциональных групп нейронов (колонок) в различных областях мозга является фактом, хорошо обоснованным экспериментальными данными [1–9], механизмы их функционирования и динамические операции внутри них остаются одной из актуальных проблем и являются полем для разнообразных гипотез, не верифицированных однозначно в эксперименте. Большинство экспериментальных и теоретических исследований в этой области сконцентрировано на изучении синхронизации и осцилляторной динамики как одного из возможных механизмов интеграции активности нейронов в колонках [10–13]. Показано, что соседние колонки имеют различные паттерны доминирующего типа динамики активности и что не все клетки вовлекаются в ритмическую активность в каждом из частотных диапазонов. Однако генераторные свойства и

функциональный тип нейронов, вовлекаемых в тот или иной частотный диапазон, детально не анализируются. Наши исследования, проведенные с помощью нейроринформационного подхода [14, 15], направлены на изучение условий и механизмов синхронизации активности нейронов различных функциональных типов в колонках. В отличие от известных методов [16, 17], основанных на анализе временной динамики активности в ответ на ступеньку тока и использовании других специальных методических приемов, в разработанных методах анализируется текущая активность нейронов и акцент делается на оценке длительности потенциала действия и его фронтов, абсолютной и относительной рефрактерности, следовых потенциалах, латентном периоде первого максимума в постимпульсных гистограммах, идентификации характеристических паттернов и переходных состояний между ними. В настоящей работе представлены данные о кратковременной и долговременной динамике активности быстрых и медленных нейронов, которая может определять степень синхронизации их активности в различных условиях функционирования.

Методы

Эксперименты проводились на зрительной коре мозга (ЗКМ) морских свинок и кошек. Мультиклеточная активность в последнем случае регистрировалась с помощью 32-канальной системы Plexon с частотой дискретизации 40 кГц. В экспериментах на ЗКМ морских свинок использовались методы вне- и внутриклеточного отведения активности нейронов с помощью блоков микроэлектродов и различные виды световой стимуляции (ориентированные полосы, границы и решетки; световые пятна). В разных экспериментах использовались блоки из трех-шести микроэлектродов, расположенных на расстоянии 50...200 мкм друг от друга и имеющих различную конфигурацию. Это обеспечивало возможность одновременной регистрации активности клеток как из соседних колонок, так и из разных слоев ЗКМ и реконструкции их взаимного пространственного расположения. Для регистрации и анализа нейронной активности применялись методы и программы собственной разработки [18].

Было разработано три версии модели нейрона: первые две – на основе уравнений Ходжкина–Хаксли [19] и третья – на основе модифицированного импульсного нейрона, МИН [20]. Первая версия, построенная на основе модели Ванга с соавторами [21], использовалась для анализа свойств ионных каналов, влияющих на динамику тех или иных фаз импульсов, обнаруженную в данной работе (см. ниже) в двух переходных состояниях бистабильности активности нейронов ЗКМ.

Во второй версии модели для эмуляции формы потенциалов действия (ПД) реальных нейронов различных типов, зарегистрированных в первичной ЗКМ морской свинки, в качестве базовой использовалась двухсегментная модель нейрона, описанная в [10]. Для оптимизации параметров модели применен модифицированный генетический алгоритм [22], который позволяет использовать преимущества элитарного отбора без сходимости решения в локальных оптимумах и существенно сокращает количество поколений, необходимых для выхода на оптимум. Модификация состоит в следующем: использование двух операций скрещивания, характерных для бинарного и вещественного представления генов в хромосомах; адаптация фактора мута-

ции в зависимости от гомогенности популяции; введение индивидуального фактора мутации для каждой особи; вторичный отбор по величине мутации. В качестве целевой функции применялась взвешенная кросскорреляция между экспериментальными данными и результатом моделирования.

В третьей версии модели нейрона при имитационном моделировании «быстрых» и «медленных» нейронов ЗКМ в качестве базового элемента выбрана модель МИН [20]. В отличие от стандартной модели нейрона импульсного типа в структуру МИН был введен ряд дополнительных блоков, в том числе – генерации импульса, дополнительного сегмента постимпульсной поляризации, адаптации порога генерации ПД и специализированной модели синаптической передачи. Модель МИН непрерывно описывает динамику мембранного потенциала (МП) и порога генерации импульса и обеспечивает следующие возможности [20]: имитация различных видов активности реальных нейронов; анализ долговременной динамики импульсной активности и МП с накоплением следовой гипер- и/или деполяризации; проведение быстрых имитационных экспериментов на сетях произвольной размерности с помощью программы собственной разработки NeuroCAD 2.01.

Результаты

В соответствии с разработанными ранее критериями [14, 23] по длительности импульса и долговременной динамике активности в ЗКМ кошки идентифицированы быстрые, промежуточные и медленные клетки, аналогичные обнаруженным в ЗКМ морской свинки. При этом соотношение нейронов разного типа варьировало в различных слоях ЗКМ, что проявляется, в частности, в сводном распределении межимпульсных интервалов (рис. 1). Видно, что динамика активности нейронов 4-го и 5-го слоев колонки существенно различна. В свете известных данных [4, 6, 8] о морфологических особенностях нейронов различных слоев коры, можно предположить, что частотная настройка и динамика активности нейронов коррелируют с их морфологическим типом.

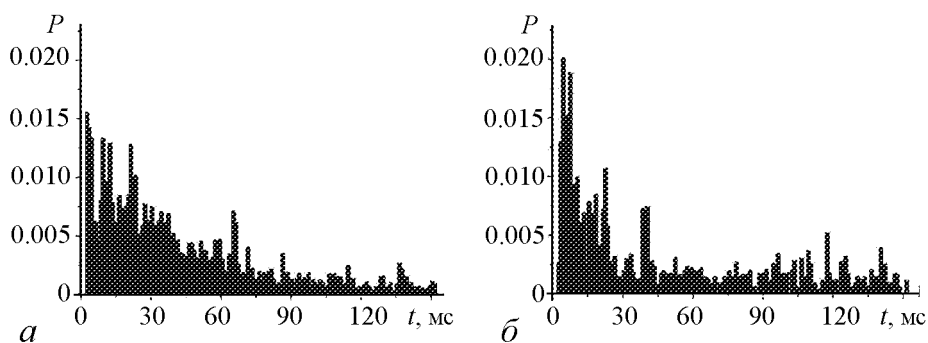


Рис. 1. Сводные нормированные распределения межимпульсных интервалов нейронов 4-го (a , $n = 17$) и 5-го (b , $n = 8$) слоев зрительной коры мозга кошки

Динамика формы импульса в двух переходных состояниях бистабильной активности нейронов. В экспериментах с квази- и внутриклеточной регистрацией активности нейронов ЗКМ морской свинки у 50% нейронов ($n = 66$) обнаружена известная [24,25] бистабильность – чередование длительных (более 1 секунды) периодов активации и инактивации ПД, сопряженных с динамикой МП нейронов. Детальное сопоставление формы ПД в двух переходных состояниях бистабильности позволило выявить ряд различий (по амплитуде и длительности быстрых фаз ПД, амплитуде и длительности следовой гипер- и деполяризации и др.) у большинства (около 80%) нейронов.

На рис. 2, I представлен пример суммации импульсов одного из нейронов ЗКМ морской свинки, зарегистрированных при внутриклеточном отведении в двух переходных состояниях бистабильной активности. Видно, что последние ПД, генерируемые перед началом пауз (рис. 2, I, *a*), имеют большую длительность по сравнению с первыми ПД после окончания пауз (рис. 2, I, *б*). При этом динамика ПД обусловлена, в основном, вариацией длительности нисходящей фазы ПД, в некоторых случаях (в основном, после периодов квазиритмической активности) наблюдается также падение амплитуды ПД. Из представленных данных следует, что динамика длительности ПД нейронов ЗКМ проявляется, в основном, в поздних фазах импульса и приурочена к переходным состояниям долговременной динамики активности отдельных нейронов. При моделировании обнаружено избирательное изменение формы и длительности переднего и заднего фронтов быстрых фаз ПД (рис. 2, II) за счет вариации максимальной проводимости быстрых натриевых каналов (рис. 2, II, *a*) и неинактивируемых калиевых каналов (рис. 2, II, *б*), соответственно. Сопоставление результатов экспериментальных исследований и моделирования позволяет предположить, что проводимость неинактивируемых калиевых мембранных каналов одного и того же нейрона различна в двух состояниях бистабильной активности. Это предположение может быть тестировано с помощью различных методов, в том числе, техники пэтч-кламп.

Наряду с описанным анализом динамики отдельных ПД, на версиях модельных нейронов с приемлемым уровнем сходства с формой ПД реальных клеток

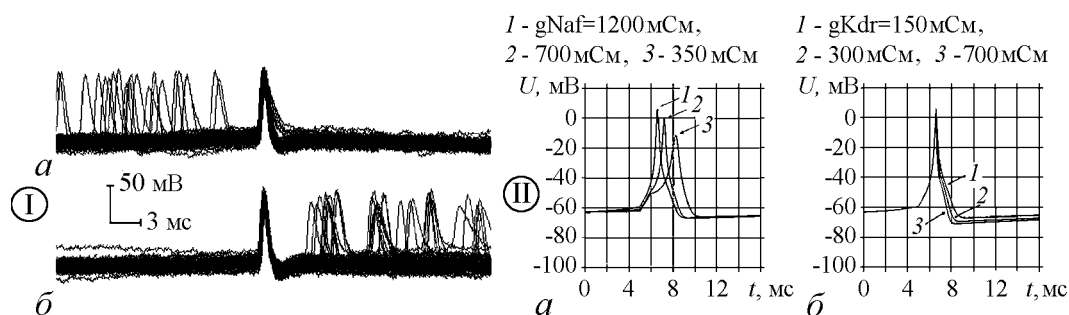


Рис. 2. Различие формы импульсов у нейрона ЗКМ морской свинки в двух переходных состояниях бистабильной активности (I) и у модельного нейрона (II) при вариации проводимости быстрых натриевых (*a*) и неинактивируемых калиевых (*б*) каналов. Обозначения в части II рисунка: по оси абсцисс – время в мс, по оси ординат – величина мембранного потенциала в мВ; для каждой из форм ПД модельного нейрона приведено значение проводимости соответствующих мембранных каналов в мСм

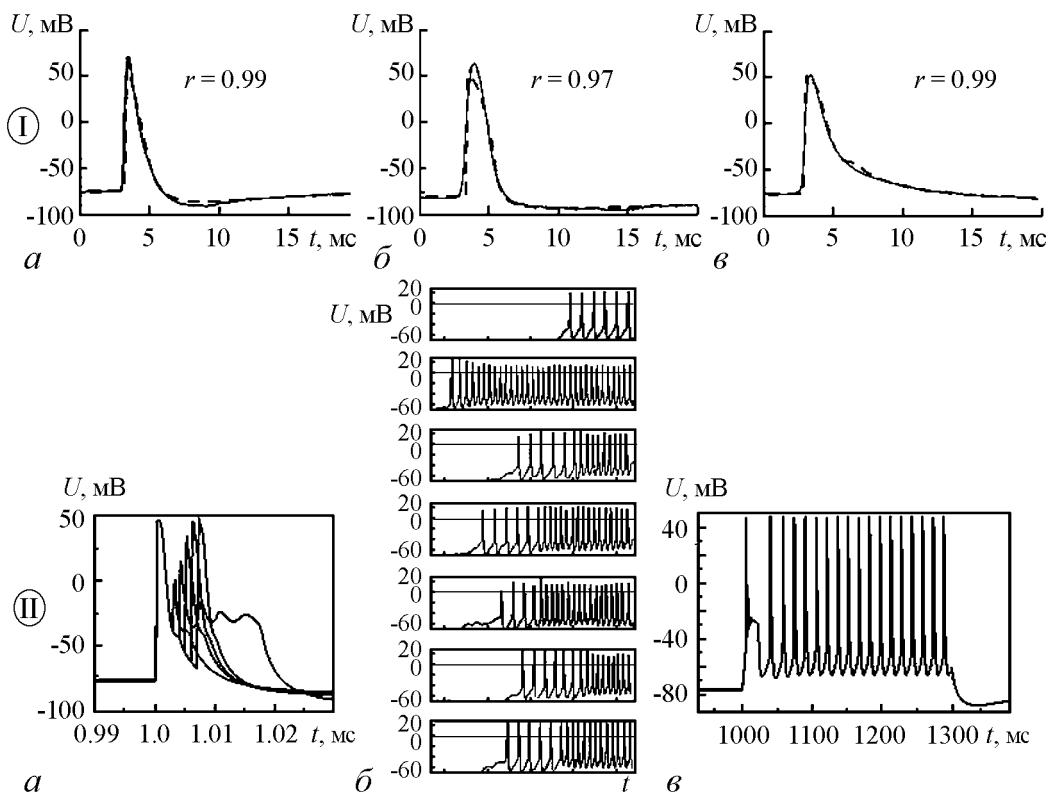


Рис. 3. Динамика активности модельных нейронов. I – имитация формы импульсов: *a* – быстрого, *б* – промежуточного и *в* – медленного нейронов, зарегистрированных при внутриклеточном отведении в ЗКМ морской свинки; сплошная линия – ПД реальных нейронов, пунктирная линия – ПД модельных нейронов; II – свойства динамики активности: *a* – падение амплитуды спайка в режиме генерации с коротким межимпульсным интервалом у нейрона «медленного» типа; *б* – бистабильность активности нейрона «промежуточного» типа в режиме автогенерации; *в* – активность нейрона «медленного» типа, близкая к известным нейронам типа Intrinsically Bursting [10,16]

(рис. 3, I, *a–в*) тестировались свойства долговременной динамики активности при вариации различных параметров: силы входных воздействий, веса синаптических связей и структуры сети. Подобно реальным клеткам, некоторые из модельных нейронов проявляли относительную рефрактерность и бистабильную активность (рис. 3, II, *a, б*). Кроме того, обнаружено, что нейроны, классифицированные в соответствии с разработанными нами критериями, могут быть сопоставлены с некоторыми известными [10] типами клеток по динамике активности в ответ на ступеньку тока (рис. 3, II, *в*).

Синхронизация активности нейронов различных типов. Разработано несколько версий нейросетевых моделей локальных нейронных групп в ЗКМ. Вычислительные эксперименты были проведены на группах модельных нейронов разного типа, не связанных между собой и имеющих приемлемый уровень сходства с формой ПД реальных клеток. Основное внимание было уделено анализу факторов, обуславливающих синхронизацию активности быстрых, промежуточных и медленных нейронов при вариации амплитуды и частоты входных импульсов.

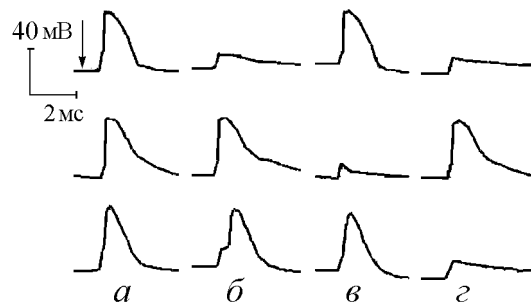


Рис. 4. Варианты (а-г) совместной активности моделей быстрого (верхний ряд), промежуточного и медленного нейронов при их синхронной активации; стрелкой отмечен момент поступления входного сигнала

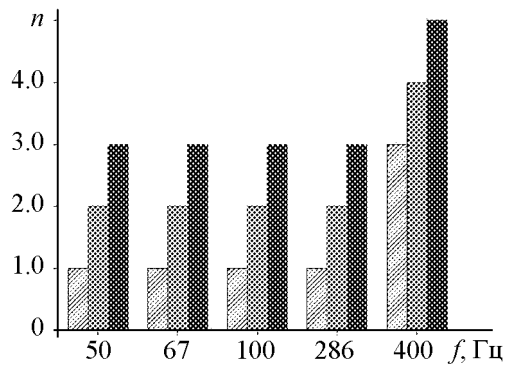


Рис. 5. Количество синхронных импульсов (ось ординат) у модельных нейронов различного типа во время периодов квазиритмической активности при изменении частоты (ось абсцисс) и силы входных воздействий (пороговый стимул – заштрихованная область; амплитуда в 1.5 раза выше порога – серый цвет и в 2 раза – черный)

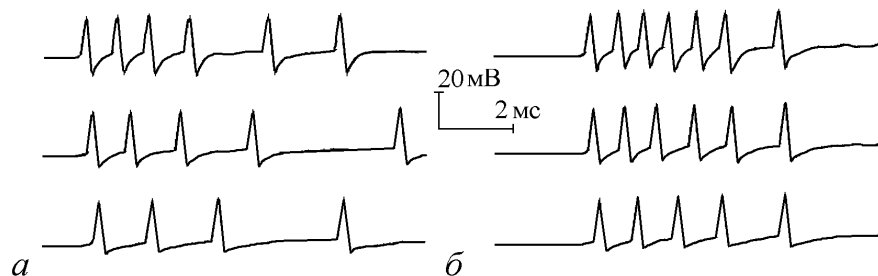


Рис. 6. Периоды квазиритмической активности быстрой (верхний ряд), промежуточной (средний ряд) и медленной (нижний ряд) модельных клеток при их синхронной активации и изменении амплитуды входных воздействий: а – пороговый стимул, б – амплитуда входных воздействий в 2 раза выше порога

Обнаружено, что в разные периоды возможны различные варианты совместной активности «быстрых», «промежуточных» и «медленных» модельных нейронов (рис. 4): а – синхронизация разрядов всех элементов; б, в – попарная синхронизация ПД разных элементов; г – асинхронные разряды модельных нейронов разного типа. При этом возбуждающие постсинаптические потенциалы у этих нейронов возникали синхронно на каждый из входных сигналов, в то время как ПД генерировались с некоторым временным сдвигом. Анализ результатов показал, что степень синхронизации активности нейронов разного типа зависит от многих факторов, таких как накопление следовой де- и гиперполяризации, частота и временное распределение входных сигналов, амплитуда входного сигнала. В частности, обнаружено увеличение длительности периодов квазиритмической активности и степени синхронизации активности нейронов разных типов при возрастании амплитуды входных воздействий в различных частотных диапазонах (рис. 5 и 6). Из рисунков видно, что выраженная синхронизация нейронов различных типов наблюдается только при сверхпороговых входных сигналах высокой частоты.

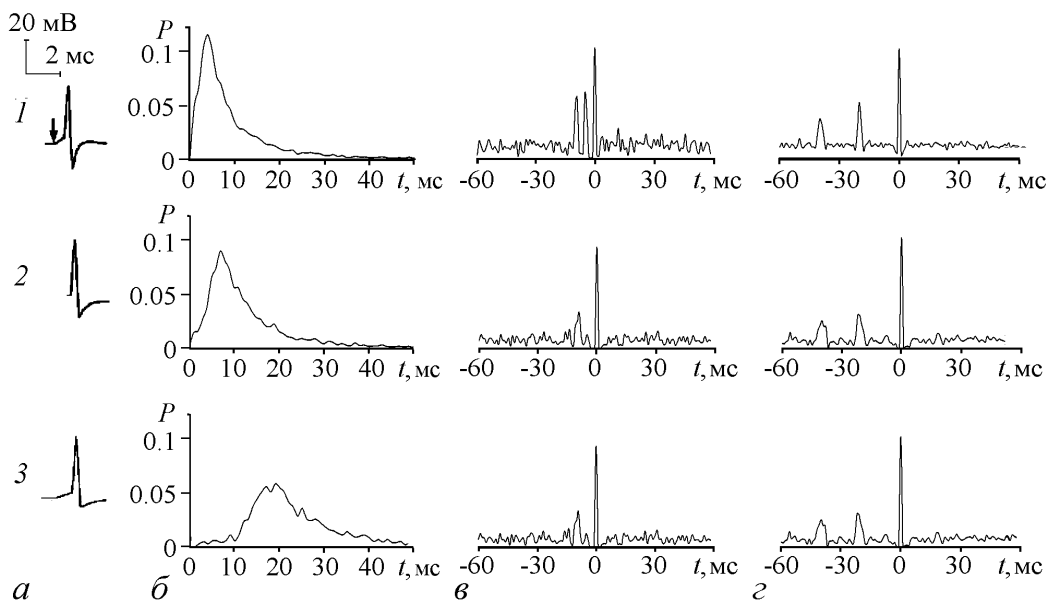


Рис. 7. Динамика активности модельных нейронов с различной постоянной времени (1–3): форма импульсов (а); постимпульсные гистограммы в ответ на предъявление последовательности входных импульсов с монотонно увеличивающейся частотой (б); периоды квазиритмической активности, выявляемые с помощью дополнительных условий на референтный импульс (наличие импульсов с минимальным интервалом, характерным для реальных быстрых (в) и медленных (з) нейронов при активации последовательностью импульсов одного из быстрых нейронов, зарегистрированных в ЗКМ морской свинки)

При этом каждая из модельных клеток преобразовывала одну и ту же последовательность входных сигналов в характерный паттерн выходных ПД, соответствующий ее собственной частотной настройке (рис. 7).

Обсуждение

Основные результаты данного исследования, проведенного с помощью нейроинформационного подхода, состоят в следующем: 1) длительности потенциала действия одного и того же нейрона зрительной коры мозга в двух переходных состояниях бистабильной активности различны; 2) степень синхронизации активности модельных элементов с различными свойствами кратковременной и долговременной динамики зависит от частоты и силы входных воздействий.

Первый факт согласуется с данными о динамике длительности и формы сложных импульсов клеток Пуркинье мозжечка морской свинки в переходных состояниях бистабильной активности [25]. В этой работе также было показано, что длительные импульсы в активности одних и тех же пар нейронов проявляют более выраженную синхронизацию по сравнению с импульсами короткой длительности. По-видимому, аналогичная зависимость степени синхронизации от длительности ПД может проявляться и в колонках ЗКМ. Нельзя исключать, что в феномене динамики длительности ПД отражается взаимосвязь генераторных внутриклеточных процессов и характера текущей активности афферентных входов. Эти предположения могут быть проверены с помощью экспериментальных методов и моделирования.

Интересно отметить, что обнаруженная максимальная выраженность синхронизации активности гетерогенных нейронов при высокой частоте сверхпороговых входных сигналов согласуется с известными фактами [17] о величине характеристических межимпульсных интервалов в афферентах от наружного коленчатого тела (2...4 мс), создающих условия для временной суммации на уровне нейронов ЗКМ.

В свете полученных и известных фактов рассмотрим возможные подходы к исследованию механизмов функционирования колонок и динамических операций внутри них. В наших экспериментальных исследованиях определены критерии идентификации центральных и периферических частей колонок как устойчивых структур ЗКМ в различных условиях функционирования. В отличие от других исследований [2, 3 и мн.др.], идентификация колонок проводилась с помощью оценки пространственного распределения активности большого числа нейронов (до 100 в одном эксперименте) с учетом временной динамики ответов при диффузной световой стимуляции, рассматриваемой как аналог белого шума, и усредненных гистограмм активности клеток, зарегистрированных в каждом микроэлектродном треке. Обнаружено, что колонки имеют две части с различными внешними и внутренними связями, свойствами динамики активности нейронов и остротой ориентационной избирательности (рис. 8 и таблица). Так, к центральным частям колонок приурочены различные афферентные входы (специфические, неспецифические и ассоциативные), в то время как периферические части активируются, в основном, по системе внутрикорковых связей. Кроме того, показано, что внутрикорковые взаимодействия избирательно активируются при коротких межимпульсных интервалах в отличие от активации общего входа при большей длительности интервала [23]. На основании этих фактов можно полагать, что синхронизация в низкочастотной области определяется в большей мере активацией общего входа, в высокочастотной – активацией внутрикорковых связей.

По-видимому, в колонках могут существовать параллельные, относительно независимые потоки переработки информации, различающиеся по скорости, связям, частотной и сенсорной настройке. Результаты их функционирования могут проявляться в совместной активности (в том числе в фазовых отношениях) нейронов разного типа («быстрые» и «медленные» клетки), которые формируют дистантные

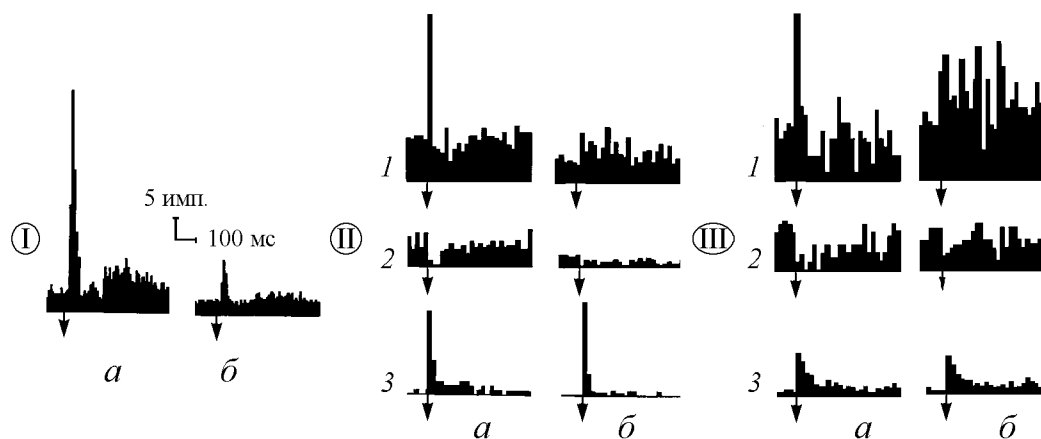


Рис. 8. Усредненные гистограммы ответов нейронов центральных (а) и периферических (б) частей колонок в ЗКМ морской свинки при диффузной световой стимуляции (I) и при активации внутрикорковых межнейронных взаимодействий с помощью электрической (II) и химической (III) микроstimуляции (1 – возбуждательные взаимодействия; 2 – тормозные; 3 – прямые эффекты микроstimуляции)

Таблица

Диапазон весов внутрикорковых межнейронных взаимодействий, выявляемых с помощью методов микростимуляции, в различных частях колонок

Расположение «ведущих» и «ведомых» нейронов	Метод микростимуляции	
	Электрическая	Ионтофорез глутамата
От IV слоя к нижним и верхним слоям внутри центральных частей колонок	0.20	0.40
От IV слоя к нижним и верхним слоям внутри пограничных зон колонок	0.06	0.30
От центральных частей к пограничным зонам внутри одной колонки	0.05	0.14
Между нейронами пограничных зон соседних колонок	0.04	0.11

выходы колонки. Возможно, что идентифицированные по временной динамике активности нейроны ЗКМ соответствуют известным [17] морфофункциональным типам нейронов (X, Y и W), обнаруженным на всех уровнях зрительной сенсорной системы (от сетчатки до коры головного мозга).

Одна из возможностей увеличения зон перекрытия временной динамики активности в колонке может быть обусловлена наличием специфических входных паттернов, которые получают «быстрые» и «медленные» нейроны, соответственно. Рассмотренные условия формирования синхронной активности в колонке могут быть детально исследованы в нейрофизиологических экспериментах (одновременное отведение нескольких нейронов наружного коленчатого тела и ЗКМ, идентификация входных и выходных элементов в колонке, исследование преобразования информации от входа к выходу по системе внутрикорковых связей и т.д.), а также с помощью имитационных моделей, в которых учтены характерные свойства структуры колонок. Такого рода подходы в настоящее время разрабатываются как в экспериментальных, так и модельных исследованиях [26–29]. На модели усредненной колонки может быть проанализирован вклад факторов, недоступных для детального изучения в эксперименте (диапазон входных паттернов, определяющих возможность синхронной активности быстрых и медленных нейронов; межуровневые взаимодействия быстрых и медленных нейронов; условия пространственно-временной суммации для активации «сильных» и «слабых» межнейронных взаимодействий).

Библиографический список

1. Коган А.Б. Функциональная организация нейронных механизмов мозга. Л.: Медицина, 1979. 224 с.
2. Хьюбел Д. Глаз, мозг, зрение. М.: Мир, 1990. 239 с.
3. Hubel D.H., Wiesel T.N. Shape and arrangement of columns in cat's visual cortex // J. Physiology. 1963. Vol. 165. P. 559.
4. Mountcastle V.B. The columnar organization of the neocortex // Brain. 1997. № 120. P. 701.
5. Freeman M. Cortical columns: a multi-parameter examination // Cerebral cortex. 2003. № 13. P. 70.

6. *Hirsch J.A., Martinez L.M.* Laminar processing in the visual cortical column // *Current Opinion in Neurobiology*. 2006. № 16. P. 377.
7. *Horton J.C., Adams D.L.* The cortical column: a structure without a function // *Phil. Trans. Roy. Soc. B*. 2005. № 360. P. 386.
8. *Katzel D., Zemelman B.V., Buetsfering C., Wolfel M., Miesenbock G.* The columnar and laminar organization of inhibitory connections to neocortical excitatory cells // *Nature Neuroscience*, Advance online publication, published 14 November 2010; doi:10.1038/nn.2687.
9. *Szentagothai J.* The neuron network of the cerebral cortex: A functional interpretation // *Proc. R. Soc. Lond. Series B*. 1978, Vol. 201, №. 1144. P. 219.
10. *Compte A., Sanchez-Vives M. V., McCormick D. A., Wang X.-J.* Cellular and network mechanisms of slow oscillatory activity (< 1 Hz) and wave propagations in a cortical network model // *J. Neurophysiol.* 2003. P. 2707.
11. *Eckhorn R., Bauer R., Jordon W., Brosch M., Kruse W., Munk M., Reitboeck H.J.* Coherent oscillations: a mechanisms of feature linking the visual cortex // *Biol. Cyb.* 1988. Vol. 60. P. 121.
12. *Gray Sh.M., Singer W.* Stimulus-specific neuronal oscillations in orientation columns of visual cortex // *PNAS*. 1989. Vol. 86, № 5. P. 1698.
13. *Hopfield J.J., Brody C.D.* What is moment? Transient synchrony as a collective mechanism for spatio-temporal integration // *PNAS*. 2001. Vol. 98. № 3. P. 1282.
14. *Подладчикова Л.Н., Тикиджи-Хамбурьян Р.А., Бондарь Г.Г., Гусакова В.И., Ивлев С.А., Дунин-Барковский В.Л.* Временная динамика активности «быстрых» и «медленных» нейронов зрительной коры мозга и мозжечка // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*. 2004. № 11. С. 50.
15. *Подладчикова Л.Н., Колтунова Т.И., Белова Е.И., Тикиджи-Хамбурьян Р.А., Ищенко И.А., Шапошников Д.Г.* Нейроинформационный подход к исследованию нейронных и системных механизмов зрительного восприятия // *Нейроинформатика – 2011. Лекции по нейроинформатике: XIII Всерос. научн-технич. конф. М.: НИЯУ МИФИ, 2011. С. 185.*
16. *Nowak L.G., Azouz R., Sanchez-Vives M.V., Gray C.M., McCormick D.A.* Electrophysiological classes of cat primary visual cortical neurons in vivo as revealed by quantitative analyses // *J. Neurophysiology*. 2003. Vol. 89. P. 1541.
17. *Orban G.A.* *Neuronal Operations in the Visual Cortex. Studies of Brain Function.* Berlin–Heidelberg; N-Y; Tokyo, 1984. 367 p.
18. *Markin S.N., Podladchikova L.N., and Dunin-Barkowski W.L.* Method to detect impulses of various duration generated by Purkinje cells of cerebellar cortex // *Pattern Recognition and Image Analysis*. 2005. Vol. 15, № 4. P. 672.
19. *Hodgkin A., Huxley A.* A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *J. Physiology*. 1952. Vol. 117. P. 500.
20. *Тикиджи-Хамбурьян Р.А.* Модифицированный импульсный нейрон как базовая модель для реальных нейронных сетей // *Нейрокомпьютеры: разработка и применение*. 2002. № 7–8. С. 97.
21. *Wang X.-J., Liu Y., Sanches-Vives M.V., McCormick D.A.* Adaptation and temporal decorrelation by single neuron in the primary visual cortex // *J. Neurophysiology*. 2003. Vol. 89. P. 3279.

22. *Тикиджи-Хамбурьян Р.А.* Модификация генетического алгоритма на основе элитарного отбора для поиска параметров биологически обоснованных моделей нейронов. // *Нейроинформатика, электронный рецензируемый журнал.* 2008. Т.3. № 1. С. 1.
23. *Подладчикова Л.Н., Тикиджи-Хамбурьян Р.А., Бондарь Г.Г., Ивлев С.А., Дунин-Барковский В.Л.* Особенности периодов квазиритмической активности «быстрых» и «медленных» нейронов зрительной коры и мозжечка: эксперимент и модель//*Мат. XIV межд. конф. по нейрокиберн., 27–30 сентября 2005.* Ростов-н/Д: Издательство ООО «ЦВВР», 2005, т. 2. 132 с.
24. *Anderson J., Lampl I., Reichova I., Carandini M. Ferster D.* Stimulus dependence of two-state fluctuations of membrane potential in cat visual cortex // *Nature Neuroscience.* 2000. Vol. 3. P. 617.
25. *Подладчикова Л.Н., Бондарь Г.Г., Ивлев С. А., Тикиджи-Хамбурьян Р. А., Дунин-Барковский В.Л.* Динамика активности клеток Пуркинье мозжечка при изменении длительности сложных импульсов // *Биофизика.* 2008. Т. 53, вып. 3. С. 488.
26. *Helmstaedter M., de Kock C.P.J, Feldmeyer D., Bruno R.M., Sakmann B.* Reconstruction of an average cortical column in silico // *Brain Res. Rew.* 2007. Vol. 55. P. 193.
27. *The Blue Brain Project.* <http://bluebrain.epfl.ch/>
28. *Thomson A.M., Armstrong W.E.* Biocytin-labelling and its impact on late 20th century studies of cortical circuitry // *Brain Res. Rew.* 2011. Vol. 66. P. 43.
29. *Silberberg G., Wu C., Markram H.* Synaptic dynamics control the timing of neuronal excitation in the activated neocortical microcircuit // *J. Physiol.* 2004. Vol. 556. 1. P. 19.

*Южный федеральный университет,
Ростов-на-Дону
Университет Дрексела, США*

Поступила в редакцию 13.07.2011

ACTIVITY SYNCHRONIZATION OF DIFFERENT NEURON TYPES IN THE COLUMNS OF THE CEREBRAL VISUAL CORTEX

*L.N. Podladchikova, R.A. Tikidji-Hamburyan, A.V. Tikidji-Hamburyan,
N.A. Shevtsova, V.A. Vasilkov, E.I. Belova, I.A. Ischenko*

The results of neurophysiological and modeling studies focused on activity synchronization among of different types of neurons and spike shape dynamics in two bistability transition states have been presented. In modeling study, spike duration range of «fast» и «slow» neurons recorded in neurophysiological experiments were simulated. While simulation of model element groups with different properties of short-term and long-term activity dynamics, it was revealed that degree of their activity synchronization depend on frequency and power of input influences; it was maximal at high frequency of super threshold input signals. Possible approach to the study of column functioning mechanisms and dynamics operations inside the columns have been considered.

Keywords: Visual cortex, columns, «fast» and «slow» cells, bistability, spike shape dynamics, activity synchronization, neurophysiological study and simulation.



Подладчикова Любовь Николаевна – родилась в 1946 году, окончила биолого–почвенный факультет Ростовского государственного университета по специальности биофизика (1969). Защитила кандидатскую диссертацию по специальности физиология (1972). Работает в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ, с 1990 г. – зав. лаб. нейроинформатики сенсорных и моторных систем. Область научных интересов: вычислительные нейронауки, механизмы интеграции локальной зрительной информации на нейронном и поведенческом уровнях, механизмы кооперативного функционирования нейронных ансамблей. Автор более 120 научных публикаций по указанным направлениям в отечественных и международных изданиях. Является рецензентом нескольких российских и международных журналов и фондов, а также членом оргкомитета многих международных конференций.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, оф. 606
Южный федеральный университет, НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
E-mail: lnp@nisms.krinc.ru



Тикиджи-Хамбурьян Рубен Акимович – родился в Ростове-на-Дону (1969), окончил физический факультет Ростовского государственного университета (1991). С 1991 г. по 2000 г. работал в ИОФРАН. С 2000 г. года работает в НИИ нейрокибернетики ЮФУ старшим научным сотрудником, и.о. зав. лаб. «Детальный анализ и моделирование нейронов и нейронных сетей». В 2003 г. защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в области моделирования нейронной активности в РГУ. Область научных интересов: вычислительные нейронауки, биолого–обоснованные модели нейрона и нейронных сетей. Автор более 30 научных публикаций по указанным направлениям. Рецензент двух международных журналов и одной всероссийской и двух международных конференций. В настоящее время является приглашенным исследователем в Центре Нейронаук Университета штата Луизиана, Нью-Орлеан, США.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, оф. 606
Южный федеральный университет, НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
E-mail: tiki_dji_ham@krinc.ru



Тикиджи-Хамбурьян Александра Владленовна – родилась в 1987 году, окончила факультет психологии Южного Федерального университета (2009). С 2005 года работает в лаборатории нейроинформатики сенсорных и моторных систем НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана Южного Федерального университета, с 2009 года – в должности младшего научного сотрудника. Область научных интересов включает вычислительную нейронауку, биологически реалистичные модели нейронов и нейронных сетей, нейронные механизмы сенсорных функций и психофизику. Имеет 7 публикаций по этим направлениям. В настоящее время обучается в аспирантуре центра интегративных нейронаук, университет Тюбингена, Германия.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, оф. 606
Южный федеральный университет, НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
E-mail: alex-z-nn@rambler.ru



Шевцова Наталья Александровна – родилась в 1951 году, окончила механико-математический факультет по специальности математика, до 2009 года работала в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ, защитила в РГУ диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук в области моделирования нейронных сетей зрительной коры мозга и сетчатки (1996). В настоящее время является ассистентом профессора в лаборатории теоретических и вычислительных нейронаук университета Дрексела (США, Филадельфия). Область научных интересов: вычислительные нейронауки, моделирование нейронных сетей, имитирующих различные структуры мозга, механизмы сенсо-моторной интеграции и нейросетевого управления. Автор более 100 научных публикаций по указанным направлениям.

Университет Дрексела, Филадельфия, США
E-mail: Natalia.Shevtsova@drexelmed.edu



Васильков Вячеслав Александрович – родился в Ростове–на–Дону (1984), окончил физический факультет «Южного Федерального университета» в 2007 году. После окончания ЮФУ работает в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ, с 2008 года в должности младшего научного сотрудника. Научные интересы: реалистические модели нейронов, нейронных сетей и систем, нейронный базис обработки информации в слуховой системе, механизмы локализации источника звука. Является автором 11 публикаций в отечественных и зарубежных изданиях, в том числе по направлениям, указанным выше.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, оф. 606
Южный федеральный университет, НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
E-mail: vva@nisms.krinc.ru



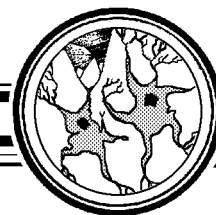
Белова Евгения Ивановна – родилась в 1957 году, окончила Ростовский государственный университет (1979). по специальности физиология человека и животных. Защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук в области физиологии эмоционального стресса, нейрофармакологии и нейрофизиологии (1994). В настоящее время работает старшим научным сотрудником НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана Южного федерального университета. В 2003 году получила ученое звание доцента по специальности «Физиология». Область интересов – синхронизация нейронной и медленной активности мозговых структур, нейрофармакология. Автор более 30 публикаций в отечественных и зарубежных изданиях по указанным направлениям, в том числе, учебного пособия «Основы нейрофармакологии» с грифом УМО по классическому университетскому образованию.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки, 194/1, оф. 606
Южный федеральный университет, НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
E-mail: evgenia_belova@mail.ru



Ищенко Ирина Александровна – родилась в Миассе (1988), окончила физический факультет Южного федерального университета по специальности медицинская физика (2010). Научные интересы: нейроинформатика, синхронизация нейронной активности, колончатая и послойная организация нейронных сетей в зрительной коре. После окончания университета работает в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана младшим научным сотрудником и обучается в аспирантуре. Имеет 7 основных публикаций по направлениям, указанным выше. Является лауреатом премии им. А.Б. Когана и членом Физиологического общества им. И.П. Павлова.

344090 Ростов-на-Дону, пр. Стачки 194/1, оф. 606
Южный федеральный университет, НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана
E-mail: ischenko.i.a@gmail.com



КОГНИТИВНАЯ НЕЙРОДИНАМИКА ДВУХ СТРАТЕГИЙ НАВИГАЦИОННОГО ПОВЕДЕНИЯ ОРГАНИЗМОВ

*В.Д. Цукерман, З.С. Еременко, О.В. Каримова,
С.В. Кулаков, А.А. Сазыкин*

В статье рассматриваются концептуальная модель и результаты вычислительных модельных исследований интегрирования траектории пространственного движения в свободно-масштабируемых сетях нелинейных осцилляторов с четным циклическим торможением. Для оценки фазовых смещений под действием внешних входов такие сети содержат две подсистемы – референтную и информационную. Популяция референтных (некодирующих) осцилляторных единиц, несмотря на то, что не принимает прямого участия в фазовом кодировании паттернов входных сигналов, играет важную роль в формировании и стабилизации многочисленных временных масштабов, в которых происходит это кодирование. Важнейшей характеристикой ансамблевого кодирования окружающего пространства является полифункциональность, то есть одни и те же ансамбли могут кодировать (когерентно представлять) различные события пространственного окружения. Получены экспериментальные доказательства возможности использования в навигационном поведении высокоточного частотно-фазового механизма в рамках ансамблевой гипотезы кодирования окружения.

Ключевые слова: Мозг, гиппокамп, навигация, математическое моделирование, нейронные сети, направление, скорость, тета-ритмы, гамма-осцилляции, фаза, интегрирование траектории.

Введение

Когнитивная нейронаука навигации, как и другие нейронаучные направления исследований мозга, обращается к параллельной обработке информации, производимой многочисленными нейронными субстратами в условиях реального пространственного поведения. Различные сенсорные входы обеспечивают навигатора многочисленным описанием текущего пространственного контекста. При этом ядром пространственного познания является интеграция мультимодальных сигналов в когерентное представление.

Сенсорные модальности, передающие пространственную информацию, можно разделить на две основные категории: *идиотетические* и *аллотетические* источники сигналов. *Идиотетические* сигналы связаны с собственным движением и включают в себя вестибулярную (инерциальную), кинестетическую информацию (от мышечных и суставных рецепторов), эфферентные копии моторных команд и сенсорные потоки информации, в частности, оптические полевые потоки сигналов, связанные с собственным движением. *Аллотетические* сигналы обеспечивают навигатора информацией о внешнем окружении и включают зрительные, звуковые, обонятельные и соматосенсорные (тактильные) источники. Другими словами, если идиотетические стимулы обеспечивают навигатора информацией, генерируемой собственным движением, то есть динамической пространственной информацией, то аллотетические сигналы описывают статические пространственные отношения (связи) между наземными ориентирами. В процессе исследования незнакомого окружения мозг навигатора обучается, выделяя когерентную информацию из такого избыточного и многомерно-го входного пространства сигналов.

Данная сенсорная модальность отмечается как аллотетическая или идиотетическая для описания типа информации, которую она передает. С другой стороны, если необходимо охарактеризовать способ, которым эта информация представлена навигатором, то надо ввести референтную координатную систему. Эта система определяет схему, в которой пространственная информация, то есть позиция объекта, может быть представлена относительно начальной точки. В зависимости от закрепления начала координатной системы одна и та же информация может быть закодирована как *эгоцентрически*, так и *аллоцентрически*. Если референтная система связана с телом навигатора или частью его тела, например, головой, то представление будет по определению эгоцентрическим. Если начало координат является фиксированной точкой окружения (например, угол комнаты), то представление будет аллоцентрическим. Ясно, что одна и та же аллотетическая пространственная информация (позиция объекта в окружении) может быть представлена как эгоцентрически, то есть относительно тела навигатора, так и аллоцентрически. Аналогично, идиотетические сигналы, например, вестибулярные, могут использоваться для описания информации о собственном движении либо эгоцентрически, либо относительно аллоцентрической референтной системы.

В статье рассматриваются концептуальная модель и некоторые результаты вычислительного моделирования нелинейной динамики осцилляторных нейронных сетей с четным циклическим торможением (even cyclic inhibitory networks, ECI-сети), показывающие, как могут быть организованы нейродинамические процессы навигационного поведения в гиппокампальной формации мозга. ECI-сеть рассматривается как часть интегратора траектории, включенного в локальную навигационную систему гиппокампальной формации, и позволяет объяснить свойства активности её специализированных клеток, а также механизм, с помощью которого такие клетки удовлетворяют вычислительным требованиям интегрирования траектории. Возможно ли кодирование независимых пространственных переменных (местоположение навигатора, местоположения ориентиров окружения, направление движения) в одной и той же нейронной сети? Наши вычислительные модельные эксперименты, связанные с исследованием навигационной нейродинамики, дают положительный ответ на этот вопрос. Проведенные исследования открывают путь к разработке бионавигационных технологий.

1. Нейробиологические основы когнитивных стратегий навигации

При решении сложных навигационных задач организмы используют две основные когнитивные стратегии: аллоцентрическую, основанную на карте, и последовательную эгоцентрическую, иногда ее называют векторной, основанную на маршруте. Эгоцентрическая стратегия реализуется с использованием идиотетических источников, таких как направление головы, глаз или движений тела и вестибулярных сигналов и, тем самым, не зависит от внешних референтов. Напротив, аллоцентрические стратегии используют аллотетические сигналы, которые фиксированы с самим окружением или отдельными внешними объектами. Это требует, чтобы навигатор кодировал отношения между окружающими ориентирами, движением и местоположением цели. В противоположность эгоцентрическим схемам местоположение объектов внутри аллоцентрических схем не меняется, когда субъект движется в данном окружении.

Эксперименты на здоровых людях поддержали идею латерализованного гиппокампального участия в пространственной навигации. Показано, что правый гиппокамп вовлекается в аллоцентрическую, основанную на карте навигацию, в то время как левый гиппокамп – в векторную, последовательную организацию выборов направлений. Оба представления параллельно активны в процессе фазы обучения [1].

Активность в левом или правом гиппокампе соответствует использованию того или иного представления, она предсказывает последующий выбор маршрута навигатором и может относиться к двум разным характеристикам активности гиппокампальных «клеток места». Активность этих клеток обеспечивает аллоцентрическое представление текущего местоположения животного в его окружении, но оно также подвергается влиянию прошлых и будущих местоположений вдоль текущей траектории животного, как это было установлено в фазе активности относительно тета-ритма [2], в модуляциях их частоты активности [3] и в последовательных паттернах активности [4], которые, вероятно, содержат в себе последовательность эгоцентрических представлений.

Гиппокамп человека разделяет два разных представления памяти уже за несколько секунд до того, как они будут выражены в поведенческих решениях, и поддерживает навигацию посредством последовательных представлений в левом гиппокампе и аллоцентрических пространственных представлений в правом гиппокампе [5]. Эти два взаимно дополняющих друг друга латерализованных представления позволяют объяснить многочисленные гиппокампальные вклады в различные аспекты пространственной и эпизодической памяти.

Важным аспектом кодирования места в гиппокампе, обнаруженным в экспериментах на животных, является топологический принцип. Так, если изменения пространственного окружения экспериментального животного достаточно гладки, положения полей активности гиппокампальных нейронов следуют непрерывно за изменением геометрии среды, то есть их отклонение непрерывно в физическом пространстве, не изменяя оригинальную относительную структуру активности клеток места. Еще более важно, что эта связь не является локальной – реакции этих полей места к изменениям геометрии окружающего пространства могут быть высоко коррелированы в пределах всего окружения. В целом, полная структура реакции полей места

состоит в том, что они будто расположены на воображаемом эластичном (резиновом) листе, который может растягиваться или сжиматься с изменениями различных частей окружения [6].

Интересно, что у новорожденных крыс, впервые совершающих обследование окружения, уже есть нормально функционирующие «клетки места» и «клетки направления головы», чуть позже в онтогенезе появляются и «решетчатые клетки» [7, 8]. Последнее означает, что восприятие пространства у млекопитающих в значительной мере врожденное. Это вполне оправдывает рассмотрение моделей нейросетевой организации с «генетически предопределенной» матрицей связей нейронов, реализующих задачи пространственной навигации, как это сделано в нашей модели ЕСИ-сетей.

2. Базовая модель интегрирования траектории на основе свободно масштабируемых ЕСИ-сетей

Специфическая организация ЕСИ-сети кодирует *относительный пространственный порядок* полей активности информационных единиц, а не зависимость той или иной информационной единицы от определенного местоположения или частного события. Важно, что относительный порядок в нейросетевом пространстве может быть зафиксирован, поскольку сеть обладает локальной фазовой когерентностью и референтной некодирующей системой осцилляторов. Таким образом, в основе феномена «восприятия» пространства в данной нейросетевой модели лежит не пассивное отражение пространственной организации внешних стимулов, а активное построение собственного внутреннего пространственного представления. И здесь важную роль играет решетчатая активность информационных единиц сети, которые коллективно «набрасывают» своеобразную координатную сетку (подобно энторинальным решетчатым полям активности) на исследуемое пространственное окружение. Непрерывная аттракторная нейросетевая модель может поддерживать активность своих нейронов для представления любого местоположения вдоль любого физического измерения, например, зрительного пространственного обзора или заданного пространственного окружения. ЕСИ-сеть может сохранять пакет нейронной активности постоянным, где бы она ни стартовала для представления текущего состояния (направления головы, позиции и т.д.).

Архитектура нейронной сети (рис. 1) представляет собой активную среду слабосвязанных нелинейных осцилляторов, генерирующих при определенных параметрах и постоянном притоке энергии извне, диапазон низкочастотных тета-ритмов и высокочастотные гамма-пачки мембранного потенциала нейронов. Это соответствует физиологическим данным о том, что гамма-осцилляции часто встраиваются внутрь более медленных осцилляций (4–12 Гц) диапазона тета-частот [9,10]. С точки зрения нейрофизиологии, такая микросхемная организация с обилием рекуррентных связей вполне оправдана; однако в данной статье на этом вопросе останавливаться не будем.

Рассмотрим вкратце математическую модель нейронных сетей с четным циклическим торможением. Более подробное описание можно найти в работах [11–14].

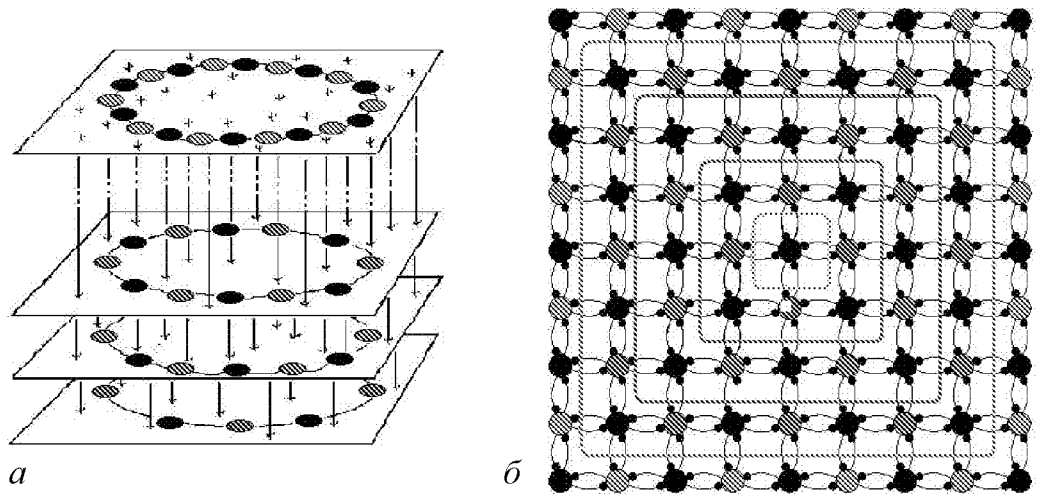


Рис. 1. *a* – Многослойная сеть с четным числом тормозных связей в любом слое (контуре) – ЕСИ-сеть; *b* – ее плоский эквивалент. Черными кружками обозначены осцилляторные модули, образующие референтные системы в каждом контуре; светлыми – информационные, на которые поступают внешние возбуждающие входы. В каждом слое, начиная с поверхностного, количество нейронов прогрессивно уменьшается. Частота генерации тета-ритма также прогрессивно убывает от поверхностного к более глубоким слоям сети. Такие рекуррентные сети, обладая глобальным торможением и локальным возбуждением, могут осуществлять интегрирование траектории движения

Математическая модель свободно масштабируемой ЕСИ-сети представлена следующим образом:

$$\begin{cases} \tau_i \frac{dx_i}{dt} = -x_i - b_i z_i - \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j + S_{0i} + S_i(t), \\ T_i \frac{dz_i}{dt} = -z_i + y_i, \\ y_i = \begin{cases} k(x_i - p_i), & x_i > p_i, \\ 0, & x_i \leq p_i, \end{cases} \quad i = 1, \dots, N, \end{cases} \quad (1)$$

где x_i – мембранные потенциалы нейронов; z_i – глубина или степень адаптации этих нейронов к постоянному уровню входного воздействия; τ_i – постоянные времени входа нейрона; T_i, b_i – параметры, определяющие постоянные времени и уровень адаптации нейронов; p_i – пороги нейронов; a_{ij} – веса тормозных связей; S_{0i} и S_i – постоянный и переменный входы нейронов; y_i – выходная активность нейронов; k – коэффициент усиления.

В частности, ее отдельный модуль – осцилляторный узел ЕСИ-сети – можно записать в виде следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \tau_1 \frac{dx_1}{dt} &= -x_1 - b_1 z_1 - a_{21} y_2 + S_{01}, \\ T_1 \frac{dz_1}{dt} &= -z_1 + y_1, \quad y_1 = k(x_1 - p_1), \\ \tau_2 \frac{dx_2}{dt} &= -x_2 - b_2 z_2 - a_{12} y_1 + S_{02}, \\ T_2 \frac{dz_2}{dt} &= -z_2 + y_2, \quad y_2 = k(x_2 - p_2). \end{aligned} \quad (2)$$

Специфическое место (позиция) информационных единиц в контурах ЕСІ-сети определяет их принадлежность к той или иной группировке (фазовому квартету) и имеет характерный для каждого контура пространственный период, зависящий от размерности сети. Фазовые квартеты, принадлежащие одному и тому же контуру сети имеют одинаковый период генерации тета-ритма. Относительные фазы информационных единиц устанавливаются и стабилизируются аттракторной динамикой, которая приводит к формированию паттерна. Пространственные фазовые отношения между парами клеток остаются стабильными в пределах длительных временных шкал. Неспецифический (общий) вход информационных единиц сети определяет линейную скорость пространственного движения объекта, а частные входы отдельных единиц – их угловые скорости. Каждый слой сети имеет уникальную область фазовых представлений высокочастотных гамма-пачек в тета-цикле, то есть смещен относительно соседних слоев в связи с тем, что существует градиент тета-частот: внешнее кольцо имеет наиболее высокую частоту, внутреннее – наименьшую частоту. Формирование многообразия установившихся ответов, благодаря рекуррентным взаимодействиям, и сдвигающий механизм, ведомый скоростными входами для переходов между установившимися состояниями, образуют основу механизма интегрирования траектории в сети. Важно подчеркнуть, что способ кодирования траекторий пространственного движения является групповым (ансамблевым).

Основываясь на анализе интегральных фазовых характеристик (рис. 2), можно заключить, что наиболее заметной особенностью нейродинамики информационных единиц сети является локальная фазовая когерентность (ступеньки фазовых кривых). Учитывая, что фаза активности нейронов гиппокампальной формации лучше коррелирует с пространственным местоположением животного, чем их частота [15], логично принять следующее допущение: ступеньки фазовых кривых соответствуют *периодическим пространственным полям* активности решетчатых клеток. Это тем более представляется разумным, так как несмотря на непрерывный характер движения виртуального навигатора его внутренние нейросетевые представления окруже-

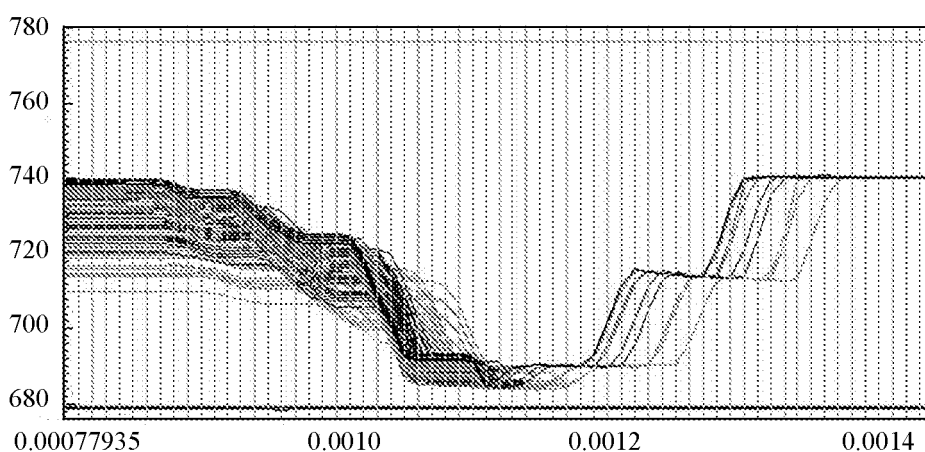


Рис. 2. Интегральное представление паттерна входного распределенного градиентного сигнала в 9-слойной ЕСІ-сети в виде семейства нелинейных статических фазовых кривых. По оси ординат: фазы нейронов, приведенные к тета-циклу; по оси абсцисс: мембранный потенциал клеток, интегрирующий сигналы скорости пространственного движения. Расстояние между вертикальными полосами соответствует шагу приращения мембранного потенциала информационных единиц в каждом тета-цикле. Все величины безразмерные

ния основываются на дискретной последовательности малого числа (шести) путевых «точек», представляющих собой отображения в сети сжатых областей физического пространства.

Вместе с тем, простое наблюдение последовательностей активации когерентных групп нейронов сети не позволяет сказать, является ли пройденный навигатором путь прямым или изогнутым, то есть имеющим форму полукруга, волны и т.д.? Неясно, что является масштабом среды, какова длина следа или каков масштаб искривления отдельных частей траектории движения? Чтобы производить более полное пространственное описание, информация о последовательности местоположений должна быть связана с пространственным масштабом и угловой информацией. Такая информация может быть получена добавлением к динамике полей места информации о скорости, направлении и продолжительности движения, то есть информации, которая не коррелирует непосредственно с местоположениями полей активности. В отсутствие любого признака прямой геометрической информации, содержащейся во временном кодировании информационных единиц, необходимо заключить, что эти единицы кодируют *топологическое устройство пространственных местоположений* или топологию внутреннего «субъективного пространства» сети. Наполнение конкретными численными данными в рассматриваемой свободно масштабируемой сети может осуществляться калибровкой углов и скоростей с учетом пространственного движения навигатора в среде заданных размеров. Картирование ориентации навигатора позволяет объяснить и упорядоченные смещения в паттернах активности информационных единиц сети, и объединение различных стимульных признаков в популяционном ответе.

Свободно масштабируемые ЕСІ-сети предоставляют уникальную возможность кодирования распределенных полевых сигналов семейством фазовых кривых, пример которого показан на рис. 2. Механизм градиентного кодирования основан на использовании ансамблей специализированных информационных единиц, осуществляющих пропорциональное кодирование. В эти ансамбли входят кодирующие единицы, занимающие определенные периодические позиции в различных кольцах сети. Так, в примере 9-слойной ЕСІ-сети два «угловых» ансамбля (по два фазовых квартета в каждом ансамбле) кодируют соответствующие *право- и левосторонние повороты* во внешнем кольце (рис. 3, *а, б*). На рис. 4 показан пример ансамбля в том же кольце, осуществляющего относительное позиционное кодирование (инвариантно к направлениям поворотов) амплитуды пространственного входного сигнала.

Главное функциональное отличие среди перечисленных выше ансамблей состоит в том, что «угловые» ансамбли информационных единиц (периодически расположенные в кольцах вдоль двух главных осей симметрии) эгоцентрически кодируют с помощью соответствующих фазовых квартетов направления поворотов навигатора *вправо*, то есть по часовой стрелке, или *влево* – против часовой стрелки относительно главной оси симметрии (на рис. 3 показано диагональю со стрелкой). Тогда как аллоцентрическое позиционное кодирование осуществляется «боковыми» ансамблями осцилляторов, инвариантными к любым поворотам навигатора (см. рис. 4). Аналогичное распределение дирекциональных и позиционных ансамблей существует и в последующих внутренних слоях ЕСІ-сети, за исключением наиболее глубоких внутренних слоев. Так, для 9-слойной сети все осцилляторные ансамбли, начиная с 5-го слоя, являются позиционными (рис. 5).

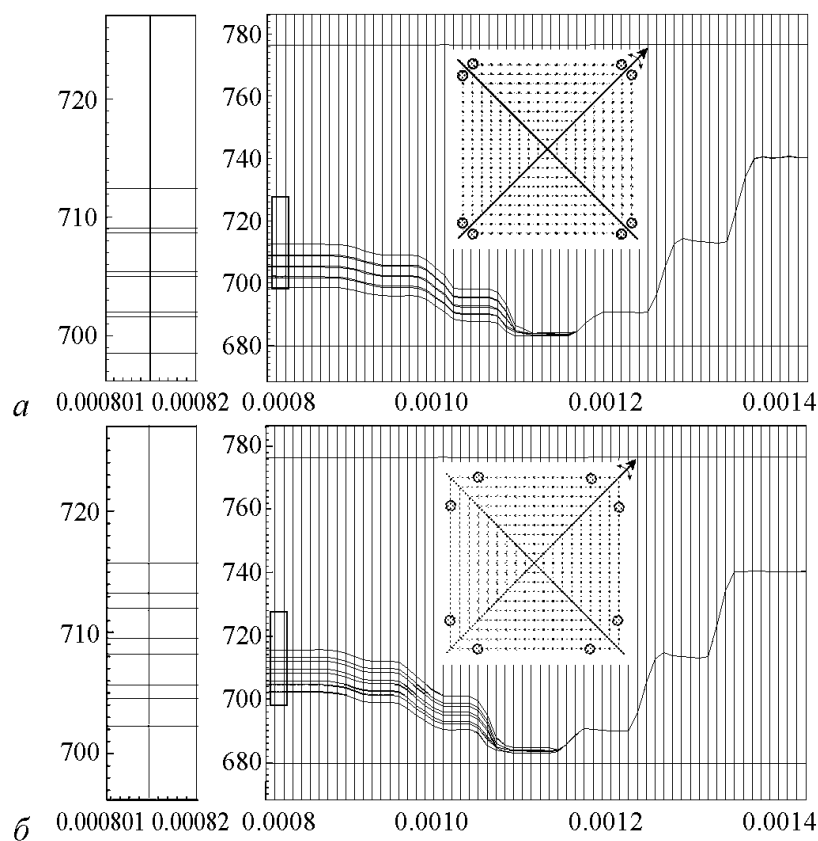


Рис. 3. Ансамбли векторного кодирования в составе интегрального фазового представления всей ЕСИ-сети (см. рис. 2). Крупными темными кружками показаны по два «угловых» фазовых квартета информационных единиц внешнего 1-го слоя (кольца). Один из квартетов кодирует левосторонние (а), другой – правосторонние (б) азимутальные повороты (ось вращения проходит перпендикулярно плоскости рисунка через точку пересечения диагоналей). Слева на каждом рисунке в увеличенном масштабе видно перекрытие фазовых областей при лево- и правосторонних поворотах. Границы тета-цикла обозначены двумя горизонтальными прямыми линиями, соответствующими активности референтных осцилляторных единиц внешнего слоя сети

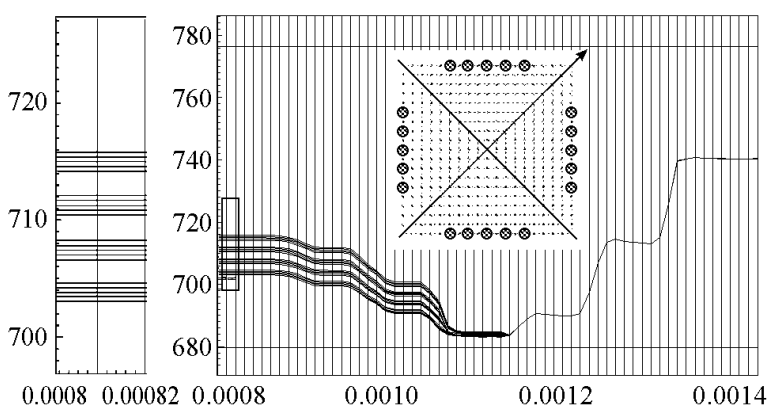


Рис. 4. Позиционное кодирование idiotических сигналов ансамблями внешнего кольца в 9-слойной ЕСИ-сети. Слева в большем масштабе показаны фазовые коды соответствующих ансамблей внешнего кольца, растянутые вдоль вертикальной оси. Видно, что кодируемая область представлена дискретными субобластями. Чтобы не загромождать рисунок, крупными темными кружками показаны «боковые» позиционные единицы только внешнего слоя сети

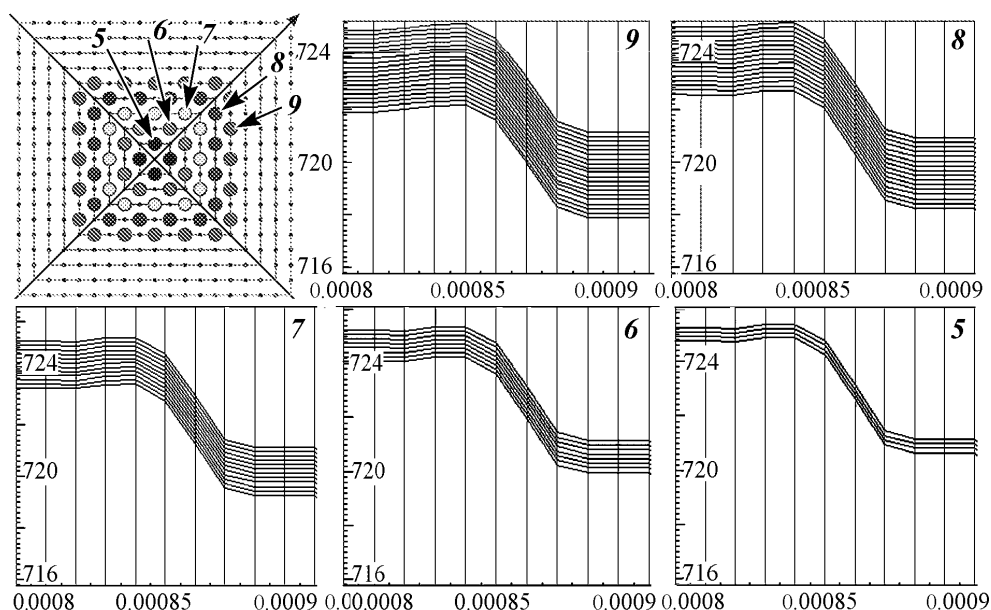


Рис. 5. Ансамбли позиционного кодирования внутренних слоев ЕСИ-сети, определяющие самолокализацию навигатора в пространстве. Слева направо на рисунке показаны: выделенная центральная область сети с соответствующими осцилляторными ансамблями 5, 6, 7, 8 и 9-го колец и далее соответствующие им фрагменты фазовых ответов. В отличие от позиционного кодирования поверхностных слоев, здесь нет функциональной дифференциации на дирекционные и позиционные ансамбли и все информационные единицы кодируют область пространства, занимаемую самим навигатором

Таким образом, несмотря на симметричную структуру модели ЕСИ-сети, она демонстрирует заметную функциональную специализацию не только ансамблей информационных единиц, но и входящих в их состав более мелких группировок нейронов – фазовых квартетов. Рассмотренные выше примеры фазового кодирования основных навигационных пространственных переменных позволяют сделать несколько важных выводов.

- Модель гиперансамбля позволяет кодировать *место и направление независимо ансамблями линейного (пропорционального) кодирования*. Эти переменные представлены скалярными величинами для аллоцентрического кодирования местоположений (в виде топографической карты) и векторами (то есть амплитудами и направлениями) в эгоцентрической последовательной маршрутизации.
- Исходя из гипотезы позиционной природы кодирования специализированных гиппокампальных нейронов («клеток места») и наших модельных экспериментов следует, что емкость гиппокампальной пространственной памяти определяется количественным *нейронным ресурсом ансамблей позиционного кодирования*. Наши вычислительные эксперименты с ЕСИ-сетями большей размерности подтверждают вывод о возрастании при этом разрешающей способности (точности) позиционного кодирования.
- Присутствие в семействах фазовых кривых сетей любой размерности *трёх ступенек локальной фазовой когерентности* говорит об устойчивости этого нейродинамического феномена и подтверждает вывод о трех направлениях пространственной симметрии, кодируемых «решетчатными» клетками энторинальной коры, экспериментально подтвержденными как на животных, так и человеке. Поясним этот вывод подробнее.

Замечательный признак энторинальной карты, обнаруженный экспериментально у грызунов (крыс), состоит в ее исключительно регулярной организации с решетками соседних клеток, имеющими общий шаг (расстояние между полями активности клеток) и общую ориентацию. Однако эти решетки пространственно смещены, но не повернуты друг относительно друга [16]. Если мозг человека также включает в себя решетчатые клетки, то наша энторинальная кора в целом должна быть более активной, когда мы движемся вдоль осей симметрии наших решеток, и менее активной при пересечении этих осей в движении. Учитывая тот факт, что у крысы обнаружено три таких главных оси и что можно двигаться «вперед» либо «назад» вдоль каждой из них (это определяет шесть направлений), можно предсказать, что активность энторинальной коры у человека также должна коррелировать с направлением движения «6-кратной дирекциональной симметрией» подобно этой. Так рассуждали авторы недавно опубликованной работы Doeller и др. [17], когда использовали виртуальную реальность и изучали интегральную нейронную активность во время «ходьбы» испытуемых по генерированному компьютером ландшафту и смотрели на области монитора, где активность имела паттерн, как сказано выше. Оказалось, что энторинальная кора человека действительно показывает этот решетчатый паттерн активности и соответствующие ей три оси симметрии у большинства волонтеров.

3. Успешная целенаправленная навигация возможна только с использованием двух стратегий и мультисенсорного обеспечения

Процесс интегрирования траектории не зависит от внешних референтов, поэтому он позволяет навигатору определять собственное местонахождение в незнакомом окружении из его самых первых исследований окружающего пространства [18]. Кроме того, интегрирование траектории является базовым механизмом для всех типов окружений (как с внешними источниками, так и без них). Ограничением и недостатком интегрирования траектории является накапливающаяся со временем ошибка. Действительно, идиотетически основанная динамика, содержащая интегрирование трансляционных и ротационных сигналов во времени, предрасположена к систематическим и несистематическим ошибкам, которые быстро нарушают оценку позиции [19]. Это, по-видимому, должно быть справедливо как для биологических, так и для искусственных навигационных систем.

Аллотетическая пространственная информация допускает формирование локальных сенсорных видов прямо предназначенных для самолокализации [20]. Аналогично, если пространственная конфигурация источников окружения (то есть наборов дистальных наземных ориентиров) остается достаточно стабильной во времени, то процесс позиционной оценки не подвергается влиянию кумулятивных ошибок. Однако аллотетические (например, зрительные) источники не всегда доступны навигатору (например, в темноте). В целом, ни идиотетические, ни аллотетические источники не достаточны сами по себе для того, чтобы надежно запоминать пространственное окружение [21–23]. Одно из решений состоит в том, чтобы комбинировать аллотетические сигналы и сигналы собственного движения в унифицированное представление. Комбинация аллотетической и идиотетической информации может принести взаимную выгоду в том смысле, что идиотетические источники мо-

гут компенсировать перцептуальную неоднозначность (например, установление различий между двумя местоположениями в зрительно симметричном окружении) и, наоборот, окружающие наземные ориентиры могут использоваться для периодического сбрасывания интегратора сигналов собственного движения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки Российской Федерации.

Библиографический список

1. *Igloi K., Zaoui M., Berthoz A., Rondi-Reig L.* Sequential egocentric strategy is acquired as early as allocentric strategy: Parallel acquisition of these two navigation strategies // *Hippocampus*. 2009. Vol. 19. P. 1199.
2. *Skaggs W.E., McNaughton B.L., Wilson M.A., Barnes C.A.* Theta phase precession in hippocampal neuronal populations and the compression of temporal sequences // *Hippocampus*. 1996. Vol. 6. P. 149.
3. *Ainge J.A., Tamosiunaite M., Woergoetter F., Dudchenko P.A.* Hippocampal CA1 place cells encode intended destination on a maze with multiple choice points // *J. Neurosci*. 2007. Vol. 27. P. 9769.
4. *Diba K., Buzsaki G.* Forward and reverse hippocampal place-cell sequences during ripples // *Nat. Neurosci*. 2007. Vol. 10. P. 1241.
5. *Igloi K., Doeller C.F., Berthoz A., Rondi-Reig L., Burgess N.* Lateralized human hippocampal activity predicts navigation based on sequence or place memory // *PNAS USA*. 2010. Vol. 107. P. 14466.
6. *Dabaghian Yu., Cohn A.G., Frank L.* Topological coding in hippocampus. 2007. <http://lanl.arxiv.org/abs/q-bio.OT/0702052>.
7. *Wills T.J., Cacucci F., Burgess N., O'Keefe J.* Development of the hippocampal cognitive map in preweanling rats // *Science*. 2010. Vol. 328. P. 1573.
8. *Langston R.F., Ainge J.A., Couey J.J., Canto C.B., Bjerknes T.L., Witter M.P., Moser E.I., Moser M.-B.* Development of the spatial representation system in the rat // *Science*. 2010. Vol. 328. P. 1576.
9. *Bragin A., Jando G., Nadasdy Z., Hetke J., Wise K., Buzsaki G.* Gamma (40–100 Hz) oscillation in the hippocampus of the behaving rat // *J. Neurosci*. 1995. Vol. 15. P. 47.
10. *Senior T.J., Huxter J.R., Allen K., O'Neill J., Csicsvari J.* Gamma oscillatory firing reveals distinct populations of pyramidal cells in the CA1 region of the hippocampus // *J. Neurosci*. 2008. Vol. 28. P. 2274.
11. *Цукерман В.Д.* Нелинейная динамика сенсорного восприятия, или Что и как кодирует мозг. Ростов н/Д.: Изд-во РГУ, 2005. 195 с.
12. *Цукерман В.Д.* Математическая модель фазового кодирования в мозге // *Математическая биология и биоинформатика*. 2006. Т. 1. С. 97.
13. *Цукерман В.Д., Каримова О.В., Кулаков С.В., Сазыкин А.А.* Современные нейробиологические данные и новое в нейродинамике навигационного поведения // *Нейрокомпьютеры: Разработка и применение* // *Радиотехника*. 2010. № 2. С. 17.

14. Цукерман В.Д. Нейродинамические основы навигационного поведения // Нелинейные волны-2010 / Отв.ред. А.В.Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. С. 396.
15. Hasselmo M.E. Arc length coding by interference of theta frequency oscillations may underlie context-dependent hippocampal unit data and episodic memory function // Learning and Memory, 2007. Vol. 14. P. 782.
16. Hafting T., Fyhn M., Molden S., Moser M.B., Moser E.I. Microstructure of a spatial map in the entorhinal cortex // Nature. 2005. Vol. 436. P. 801.
17. Doeller C., Barry C., Burgess N. Evidence for grid cells in a human memory network // Nature. 2010. Vol. 463. P. 657.
18. Griffin A.S., Etienne A.S. Updating the path integrator through a visual fix // Psychology. 1998. Vol. 26. P. 240.
19. Mittelstaedt H., Mittelstaedt M.L., Homing by path integration / F., Wallraff HG (eds.), Avian Navigation, Springer, Berlin Heidelberg, 1982.
20. McNaughton B.L., Chen L.L., Markus E.J. Dead reckoning, landmark learning, and the sense of direction: A neurophysiological and computational hypothesis // J. Cog. Neuroscience. 1991. Vol. 3. P. 190.
21. Redish A.D., Touretzky D.S. The role of the hippocampus in solving the Morris water Maze // Neural Computation. 1998. Vol. 10. P. 73.
22. Jeffery K.J., O'Keefe J.M. Learned interaction of visual and idiothetic cues in the control of place field orientation // Exp. Brain Research. 1999. Vol. 127. P. 151.
23. Berthoz A., Viaud-Delmon I. Multisensory integration in spatial orientation // Curr. Opin. Neurobiology. 1999. Vol. 9. P. 708.

*Южный федеральный университет
Ростов-на-Дону*

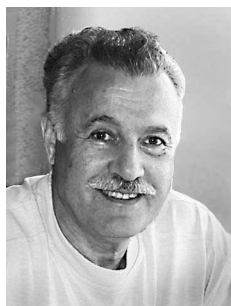
Поступила в редакцию 14.07.2011

COGNITIVE NEURODYNAMICS TWO STRATEGIES NAVIGATION BEHAVIOR OF ORGANISMS

V.D. Tsukerman, Z.S. Yeremenko, O.V. Karimova, S.V. Kulakov, A.A. Sazykin

The conceptual model and computer simulations results of path integration in free-scalable nonlinear oscillator neural networks with even cyclic inhibition (ECI-networks) are discussed in this paper. To estimate the phase shifting under input impact the ECI-networks contain two subsystems namely reference and information ones. The population of reference (nonencoding) oscillatory units has significant role in generation and stabilization of numerous time scales despite it don't assist directly in the phase pattern encoding of input signals. Multifunctionality is the main characteristics of ensemble encoding of environment space because the same ensembles can encode (to present coherently) different events of environment space. It was experimentally shown that the high-precision frequency-phase mechanism in the frameworks of ensemble hypothesis can be used in navigation behavior.

Keywords: Brain, hippocampus, navigation, mathematical modeling, neural networks, direction, rate, theta rhythm, gamma oscillations, phase, path integration.



Цукерман Валерий Давидович – родился в 1945 году в г. Баку, окончил физ-фак Ростовского государственного университета в 1973 году. После окончания РГУ работает в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана РГУ, а затем Южно-го федерального университета ведущим научным сотрудником, заместителем директора по прикладным исследованиям. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата биологических наук в 1982 году по специальности биофизика в Ленинградском государственном университете. Автор монографий «Механизмы координации движений» и «Нелинейная динамика сенсорного восприятия или что и как кодирует мозг». Опубликовал около 50 научных статей по осцилляторным нейронным сетям, нелинейным колебаниям в нервной системе, механизмам бионавигации.

344090 Ростов-на-Дону, проспект Стачки, 194/1
Южный федеральный университет
E-mail: vdts@krinc.ru



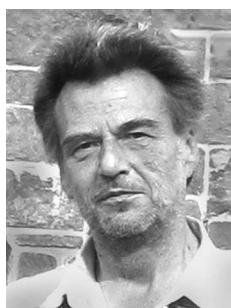
Еременко Зоя Сергеевна – родилась в 1988 году в Грозном, окончила с отличием физический факультет Южного Федерального Университета г. Ростова-на-Дону в 2011 году. В этом же году присвоена степень магистра физики по направлению «Физика». Работает лаборантом в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ. Имеет 5 научных публикаций.

344090 Ростов-на-Дону, проспект Стачки, 194/1
Южный федеральный университет
E-mail: zoj4a@rambler.ru



Каримова Оксана Валерьевна – родилась в Ростове-на-Дону, окончила физический факультет Южного федерального университета в 2009 году, защитила магистерскую диссертацию в области моделирования нейронных сетей и когнитивной нейродинамики. Учится в заочной аспирантуре физического факультета ЮФУ. Работает в НИИ Нейрокибернетики им. А.Б.Когана ЮФУ мл. научным сотрудником. Имеет 9 научных публикаций по направлениям, указанным выше.

344090 Ростов-на-Дону, проспект Стачки, 194/1
Южный федеральный университет
E-mail: rikari@km.ru



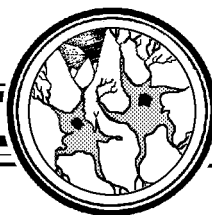
Кулаков Сергей Владимирович – родился в 1951 году в Ташкенте. Окончил физический факультет Ростовского государственного (с 2007 года Южного федерального) университета в 1973 году. Ведущий программист НИИ Нейрокибернетики им. А.Б. Когана ЮФУ. Имеет 11 печатных работ и 3 Свидетельства о регистрации программных комплексов.

344090 Ростов-на-Дону, проспект Стачки, 194/1
Южный федеральный университет
E-mail: w503@krinc.ru



Сазыкин Алексей Александрович – родился в 1979 году, окончил биологический факультет Ростовского Государственного университета в 2001 г. (с 2007 года Южный федеральный университет). Занимается разработкой приборов медико-биологического назначения, навигационных средств, систем аппаратной обработки видеоизображения и звука. Является автором и соавтором 18 публикаций в научных и научно-популярных изданиях. Работает в НИИ нейрокибернетики им. А.Б. Когана научным сотрудником.

344090 Ростов-на-Дону, проспект Стачки, 194/1
Южный федеральный университет
E-mail: rv6lqx@mail.ru



ФРАКТАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АКТИВНОСТИ НЕЙРОНОВ И ПОВЕДЕНИЯ МОДЕЛИ

А.К. Крылов

Показано, что наличие фрактальной структуры в активности нейронов не объясняется теорией рефлекса. Построена редуцированная модель формирования и реализации индивидуального опыта, основанная на классическом рефлекторном представлении структуры опыта в виде дерева. Поведение такой модели не обнаруживает фрактальных свойств. Предполагается, что более адекватной будет нерелекторная модель структуры опыта в форме дерева навыков. Показана возможность использования оценки нелинейных (фрактальных) свойств данных для проверки теоретических представлений.

Ключевые слова: Моделирование, фрактальный анализ, поведение.

В настоящей работе показано, как теоретические представления о закономерностях структуры опыта могут быть проверены путем построения модели и проверки реализуемого ею поведения на нелинейность в сопоставлении с нелинейными (фрактальными) свойствами поведения организма и активности нейронов.

Метафоры теории рефлекса о мозге: от фонтана к калькулятору

В XVII веке вследствие развития механики появилась механистическая метафора работы мозга – Декарт предположил наличие сходства между функционированием фонтана (движение воды по трубам) и нервной системой человека (движение «животных духов» по нервам). В дальнейшем на основе этих общефилософских материалистических представлений И.П. Павловым была разработана *теория рефлекса*. В ней представления Декарта были выражены постулатом о детерминации внешним стимулом *последующего* поведения (называемого *реакцией*).

В XX веке на смену рассматривавшимся до этого аналогиям между мозгом и гидравлической машиной, а затем и телефонным коммутатором, пришла новая метафора, полагающая мозг аналогом компьютера. Функцией нейрона, как и мозга в целом, в соответствии с «вычислительной метафорой» (обзор см. в [3]) оказалось перекодирование входного сигнала в выходной. Мозг стали рассматривать

как электронную схему, которая входные сигналы («стимулы») перекодирует в выходные («реакции»). Эта идеология была заложена в Neural Networks. В парадигме реактивности, основанной на механицизме и редукционизме, кажется адекватным видеть сходство между очередной новинкой технического прогресса и живым организмом. Критикуя такую установку мышления, Н.А. Бернштейн назвал ее «семероморфизм» – оформление по образцу и подобию сегодняшнего дня (обзор и критику парадигмы реактивности см., например, в [3]).

На основании проведенного нами и другими исследователями анализа парадигмы реактивности и основанной на ней теории рефлекса, мы считаем [3], что сущность теории рефлекса можно выразить следующей формулировкой: индивид, в своем действии и состоянии, объективно отражает предшествующий внешний сигнал (воспринимаемую часть внешней среды). Это утверждение представимо следующей формулой: $Y(t + \tau) = f(S(t))$, $\tau > 0$ (1). Обозначения: $S(t)$ – внешний сигнал, воспринимаемый индивидом; $Y(t)$ – действие индивида в момент t ; f – некоторая функция. Эта формула описывает причинно-следственную связь – причиной является внешний сигнал (S), следствием является действие индивида (Y): если S , то Y . Эта формулировка означает, что между воспринимаемым внешним сигналом и последующим поведением имеется функциональная зависимость. Формула (1) есть, можно сказать, определение «вычислителя», ее можно озвучить и так: к входному сигналу $S(t)$ применяется некая функция f и с задержкой τ выдается результат вычисления. Соответственно, и функцией нейрона в парадигме реактивности оказывается преобразование входного сигнала в выходной.

Фрактальная активность нейрона как несоответствие рефлексорной теории

В классических рефлексорных представлениях предполагалось, что спайковая активность нейрона детерминируется входным сигналом, только в этом случае нейрон может исполнить роль перекодирующего элемента. Считалось, что нейрон – не вполне идеальная электронная схема и перекодирует входной сигнал неточно, и что спайковая активность нейронов представляет собой пуассоновский процесс, то есть очередной спайк и межспайковый интервал не зависят от предшествующей активности нейрона. Однако позднее было обнаружено не только наличие корреляций между последовательными межспайковыми интервалами, которое можно было бы объяснить марковской моделью с конечной глубиной памяти, но и наличие корреляций на разных временных масштабах, то есть фрактальные свойства нейронной активности [10]. Такие свойства нейронной активности не соответствуют представлению о роли нейрона как перекодирующего элемента, поскольку в этом случае по выходной активности нейрона нельзя сказать, каким был входной сигнал.

Если нейрон является функциональным преобразователем типа $(\text{выход}(t+1)) = F(\text{вход}(t))$, как это предполагает классическая рефлексорная теория, то при подаче на вход простого сигнала (константа или синусоида), на выходе не может появиться фрактальная структура. Однако она обнаруживается рядом авторов [1, 2, 4, 7–9]. Наличие фрактальных свойств нейронной активности означает особый тип детерминации активности клетки – не рефлексорный, но и не полностью случай-

ный (рис. 1). Поэтому наличие фрактальной размерности в последовательности межспайковых интервалов является нарушением рефлекторной схемы детерминации, и некоторыми авторами рассматривается как доказательство того, что организм и нейрон обладают «внутренним инициатором действий», «внутренней причинностью» [8].

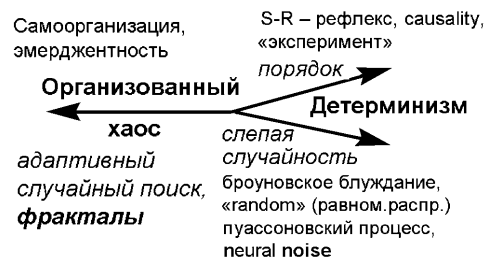


Рис. 1. Наличие фрактальных свойств нейронной активности

Проверка нейронной активности на фрактальность

Один из простейших методов проверки на фрактальную размерность – построение гистограммы межспайковых интервалов в логарифмических координатах (рис. 2, б), с проверкой возможности аппроксимации хвоста распределения прямой линией, означающей наличие степенной зависимости в исходных данных, и временной инвариантности – самоподобия распределения на разных масштабах времени (рис. 2, в).

Нами обнаружено несколько типов гистограмм межспайковых интервалов [2], один из которых может рассматриваться как свидетельство в пользу наличия у некоторых нейронов фрактальной структуры их активности.

Более надежные тесты – фактор Фано (ФФ) и метод DFA (detrended fluctuation analysis) [1,7,9]. Для вычисления ФФ вся запись нейронной активности последовательно разбивается временными окнами величины T и в каждом окне подсчитывается число спайков $N_i(T)$, попавших в это i окно (рис. 2, а). Фактор Фано для каждого T вычисляется как отношение дисперсии к среднему значению последовательности $N_i(T)$. Для пуассоновских процессов он равен единице для любого T .

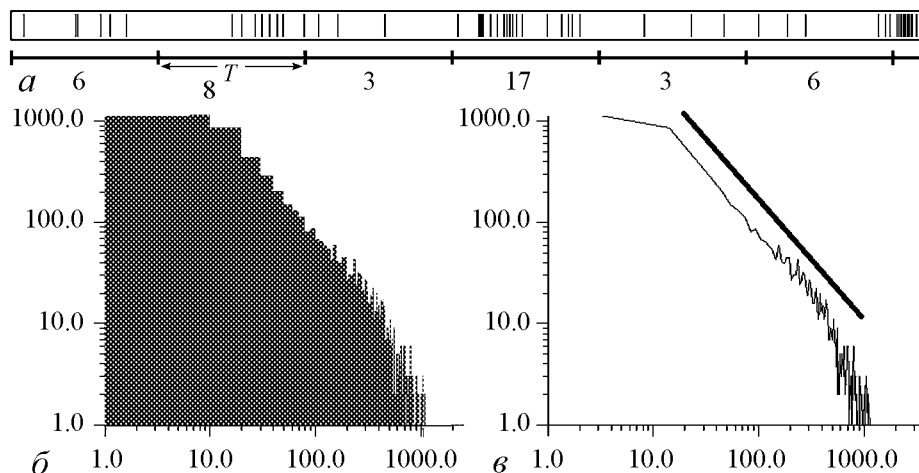


Рис. 2. а – фрагмент активности нейрона (10 с): вертикальные штрихи – моменты спайков; под ними – временные окна величины T , цифры – число спайков, попавших в это окно. б – гистограмма межспайковых интервалов в логарифмических осях. По оси абсцисс – величина бина (в мс). По оси ординат – величина межспайкового интервала (в мс). в – та же гистограмма, но в форме линии, соединяющей вершины бинов. Рядом показана аппроксимирующая прямая (наклон равен -1.2)

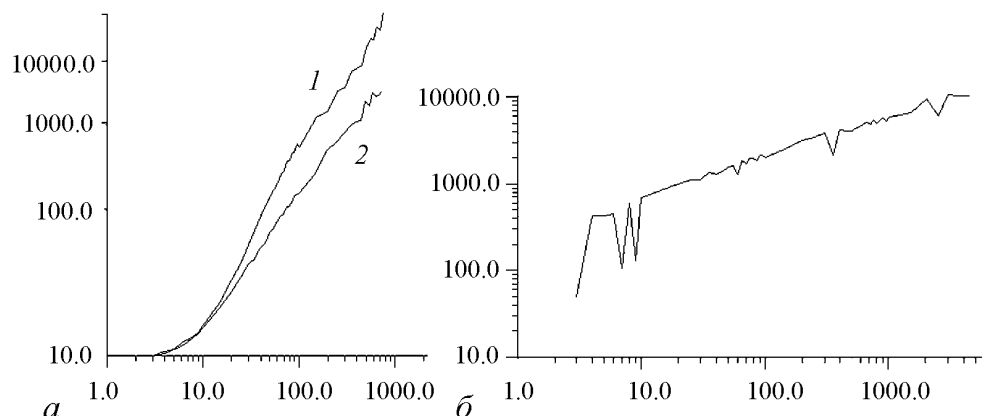


Рис. 3. *a* – фактор Фано для того же нейрона, что и на рис. 1. Оси в логарифмическом масштабе. Кривая 1 (угол наклона равен 0.33) – для исходных данных, кривая 2 (угол наклона равен 0.26) – для перемешанных. По оси абсцисс – время (мс). *б* – DFA для того же нейрона. График аппроксимируется прямой линией с наклоном 0.53

Для фрактальных процессов с увеличением T ФФ растет и аппроксимируется прямой в логарифмических осях (рис. 3, *a*). Причиной может быть как распределение межспайковых интервалов, так и их последовательность. Чтобы выяснить этот вопрос, вычисляется также ФФ для перемешанной последовательности межспайковых интервалов (кривая 2 на рис. 3, *a*). В приведенном примере асимптотика ФФ сохраняется и после перемешивания, что означает, что сама статистика межспайковых интервалов, а не только их специфическая последовательность, в данном случае дает такие показатели ФФ.

Структуры индивидуального опыта в парадигмах активности и реактивности

В рефлекторной теории (РТ), разработанной И.П. Павловым, индивидуальный опыт представлялся как набор рефлексов. Рефлекс является преобразованием входного сигнала в выходной (см. выше). В теории функциональных систем, разработанной П.К. Анохиным, элементом индивидуального опыта является функциональная система (ФС), а структура опыта состоит из набора функциональных систем. Функциональная система нацелена на достижение определенного результата – нового соотношения организма со средой. В РТ считается, что рефлекторное действие (рефлекс обеспечивает связь стимул–реакция) просто выполняется, и неизвестно, к чему приведет. В отличие от РТ, с точки зрения теории ФС, элементы структуры опыта целенаправленны. РТ соответствует парадигме реактивности, а теория ФС к парадигме активности [3]. Системно-эволюционная теория (СЭТ), разработанная В.Б. Швырковым [6] и его школой [3,5], является развитием теории ФС. В СЭТ показано, что новая ФС формируется как наслаивание на имеющуюся структуру опыта [3,6]. При этом новая ФС позволяет достигать более дифференцированного результата поведения, то есть учитывать больше деталей в соотношении со средой [3,5,6].

В экспериментах нашей лаборатории животные обучались инструментальному пищедобывательному поведению: нажимали на правую педаль, чтобы получить пищу из правой кормушки и нажимали левую педаль, чтобы получить пищу из левой кормушки [5]. Кроме того, животные учились захватывать пищу из кормушек и с руки.

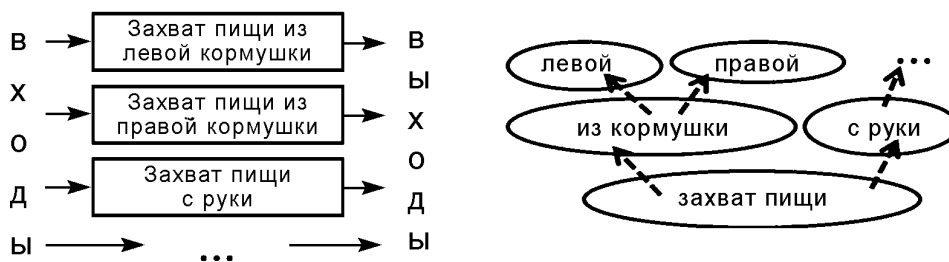


Рис. 4. *a* – структура опыта по теории рефлекса. *б* – структура опыта по системно-эволюционной теории – наслоение навыков. Последовательность обучения – снизу вверх

С точки зрения РТ, у животных формировалась структура опыта, представляющая собой набор рефлексов (рис. 4, *a*). В РТ допускаются произвольные модификации структуры опыта: можно добавить новый рефлекс к набору имеющихся, можно модифицировать имеющийся (ослабить или усилить), можно удалить имеющийся. Такие представления о структуре опыта можно назвать линейными – элементы опыта формируются независимо друг от друга и последовательность их формирования (история обучения) не имеет значения.

С точки зрения СЭТ, у животных формировались функциональные системы достижения соответствующих результатов, причем эти ФС образуют структуру типа дерева: от менее дифференцированных (более общих) к более дифференцированным (более конкретным) (рис. 4, *б*). Под менее дифференцированным элементом опыта понимается умение захватить пищу вообще, неважно откуда; а под более дифференцированным – умение захватить пищу, например, конкретно из левой кормушки. Эксперименты показали, что сформированная однажды ФС в дальнейшем не может «стереться» – обучение «вместо выученного ранее поведения захватывать пищу из левой кормушки, теперь захватывать пищу из правой» заключается не в стирании существующей ФС, а в наслоении новой ФС, которая будет реализоваться вместо прежней [3,5,6]. Поэтому история обучения имеет принципиальное значение для формирования структуры опыта [3,5,6]. Таким образом, СЭТ утверждает нелинейность структуры опыта.

Ранее нами была построена математическая модель формирования структуры опыта на основе РТ (см. рис. 4, *a*) и проведены эксперименты с ней как с компьютерной моделью мобильного робота в задаче фуражирования [3]. Проведенный анализ поведения модели позволил выявить ряд нелинейных феноменов [3].

В настоящей работе мы построили редуцированную модель формирования и реализации опыта на основе представлений СЭТ. Структура опыта образовывалась в форме дерева (рис. 5) одновременно с реализацией соответствующего поведения. В качестве модельной задачи мы использовали не полную задачу фуражирования, как раньше, а ее редуцированный вариант – задачу поискового поведения в неизменной среде, то есть агент ищет пищевые объекты, но они отсутствуют. В этом случае ситуация, с точки зрения агента, постоянная – он не видит и не находит ничего. С точки зрения РТ, в этой задаче вход постоянный – нулевой, стимулы отсутствуют. Эта задача интересна тем, что, несмотря на отсутствие каких-либо стимулов, поведение животных в ней оказывается нелинейным и демонстрирует фрактальную структуру [4]. В терминах РТ получается, что при нулевом входе генерируется нелинейный выход – что невозможно с точки зрения РТ. Поэтому подобные результаты

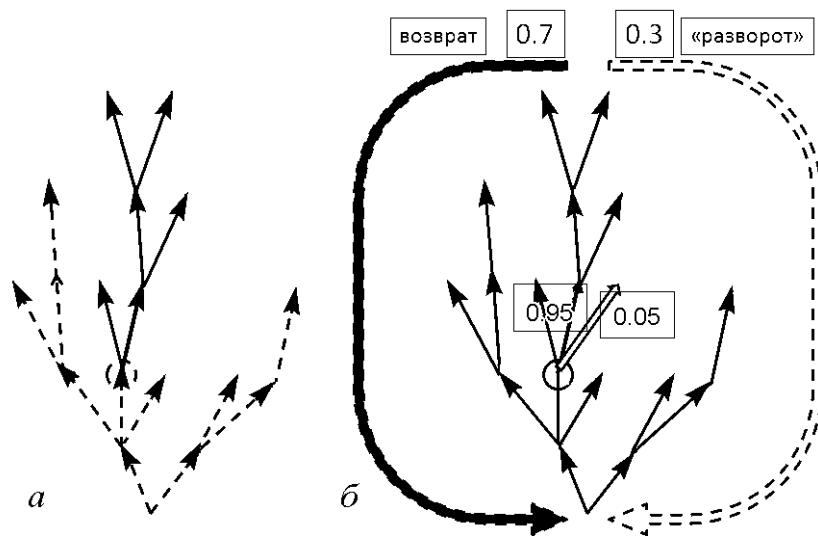


Рис. 5. *а* – дерево опыта: кружком обведена текущая ситуация, черными стрелками показаны возможные развития событий. *б* – иллюстрация к редуцированной модели формирования и реализации опыта в виде дерева ситуаций: вероятность порождения новой ситуации равна 0.05, вероятность «начать с начала» равна 0.7

противоречат РТ. Некоторые авторы считают, что эти данные доказывают наличие внутренней причинности [8].

Структура опыта по упрощенному алгоритму и схема поведения агента следующие (см. рис. 5):

- на каждом такте времени актуален определенный узел дерева опыта;
- с вероятностью 0.05 формируется новый элемент опыта, наслаивается на текущий узел дерева (образуя новую ветвь), и он выбирается в качестве следующего и совершается тот же акт;
- в противном случае делается выбор элемента среди имеющихся исходов из данного узла (ветвей), пропорционально их длине и ветвистости;
- если не сработало предыдущее правило, то, когда дошли до конца дерева (до листа), с вероятностью 0.7 агент продолжает поведение, переходя к корню дерева, а с вероятностью 0.3 агент совершает действие «разворот» и снова актуализируется корневым элементом дерева, на этом цепочка действий завершается и начинается новая.

При компьютерной симуляции мы регистрировали структуру формирующегося опыта и длительность поведенческих цепочек – интервалы времени движения в одном направлении без разворота. Таким образом, данные модельного эксперимента можно сопоставить с данными эксперимента на животных [4].

Длительность поведенческих цепочек была проанализирована на наличие фрактальной размерности с помощью показателя DFA [7] и фактора Аллана [1,9]. При варьировании в модели вероятности формирования нового элемента опыта (от 0.02 до 0.05) и вероятности пассивного возврата к корню дерева (от 0.7 до 0.9) показатели альфа-DFA и фактор Аллана демонстрировали отсутствие фрактальной структуры в поведении модели. Следовательно, наша редуцированная математическая модель не описывает системную сложность, присущую реальной биологической системе в мере, достаточной для того, чтобы модель проявила такое принципиальное свойство, как фрактальность.

Полученный результат говорит не в пользу принятого в теории рефлексов и ИИ представления знаний в виде дерева ситуаций и переходов между ними (рис. 4, а; рис. 5). Возможно, обоснованное системно-эволюционной теорией представление знаний в форме дерева навыков (рис. 4, б) окажется более адекватным. Необходимо развитие моделирования в этом направлении для отражения обнаруженных в экспериментах нелинейных нейробиологических и поведенческих закономерностей. При этом может использоваться оценка нелинейных (фрактальных) свойств в поведении модели для определения ее адекватности.

Работа поддержана фондом РГНФ (грант № 11-06-00482а), Советом по грантам Президента Российской Федерации ведущим научным школам Российской Федерации (проект № НШ-3752-2010.6).

Библиографический список

1. Дымов А.Б. Использование факторов Фано и Аллана для анализа свойств спайковой последовательности нейронов слуховой системы // Тр. 11-й Всерос. научно-технической конф. «Нейроинформатика-2009». М.: МИФИ, 2009. Ч. 1. С. 257.
2. Крылов А.К. Нелинейные и фрактальные свойства нейронной активности – следствия для моделирования // Материалы XV Международной конференции по нейрокибернетике. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ, 2009. Т.1. С. 105.
3. Крылов А.К., Александров Ю.И. Парадигма активности: от методологии эксперимента к системному описанию сознания и культуры // Компьютеры, мозг, познание: Успехи когнитив. наук / Отв. ред. Б.М. Величковский, В.Д. Соловьев. М.: Наука, 2008. С. 133.
4. Непомнящих В.А. Как животные решают плохо формализуемые задачи // Проблемы интеллектуального управления – общесистемные, эволюционные и нейросетевые аспекты / Нейроинформатика-2003. М.: МИФИ, 2003. С. 186.
5. Созинов А.А. и др. Условия и мозговое обеспечение интерференции при формировании системной структуры индивидуального опыта // Тенденции развития современной психологической науки / Отв. ред. А.Л. Журавлев, В.А. Кольцова. М.: Институт психологии РАН, 2007. Ч. 2. С. 343.
6. Швырков В.Б. Введение в объективную психологию. Нейрональные основы психики. М.: Институт психологии РАН, 1995.
7. Bhattacharya J. et al. Long-range temporal correlations in the spontaneous spiking of neurons in the hippocampal-amygdala complex of humans // Neuroscience. 2005. Vol. 131. P. 547.
8. Brembs B. et al. Order in spontaneous behavior // Soc. Neurosci. Abstr. 2005. Vol. 754. P. 2.
9. Teich M.C. et al. Fractal character of the neural spike train in the visual system of the cat // J. Opt. Soc. Am. A. 1997. Vol. 14. P. 529.

Институт психологии РАН, Москва

Поступила в редакцию 11.07.2011

FRACTAL ANALYSIS OF NEURON'S ACTIVITY AND MODEL'S BEHAVIOR

A.K. Krylov

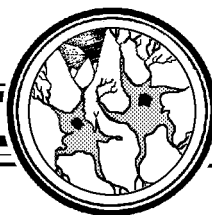
It is shown that discovered fractal properties of neuronal interspike interval sequence contradicts the reflex theory. The simplified model of formation and realization of individual experience based on reflex theory view of individual experience structure as a tree has been proposed. Behavior of the model does not show fractal properties. It is suggested that non-reflex model of individual experience structure formed as a tree of skills is needed. It is shown the possibility of nonlinear (fractal) properties estimation in the data for evaluation of a theory.

Keywords: Model, fractal analysis, behavior.



Крылов Андрей Константинович – родился в Москве (1975), окончил Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова (1996). После окончания МГУ закончил аспирантуру в Институте психологии РАН. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата психологических наук в ИП РАН (2007) по психофизиологии. Опубликовал 30 научных работ по моделированию работы мозга и поведения.

129366 Москва, ул. Ярославская, 13
Институт психологии РАН
E-mail: neuru@mail.ru



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.

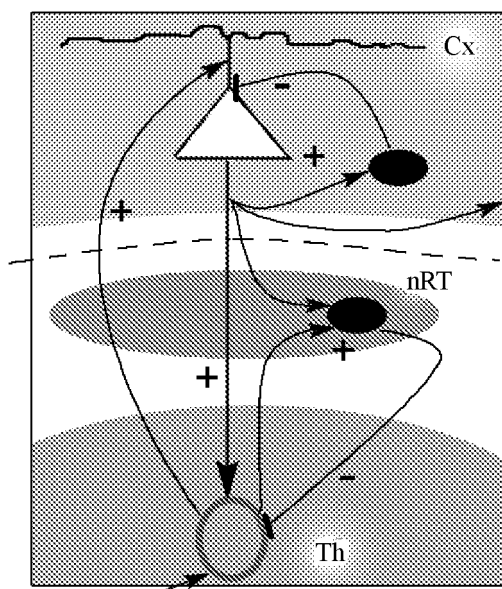


Рис. 1. Взаимосвязи пирамидных нейронов и интернейронов коры Cx и ядер таламуса: сенсорного Th и ретикулярного nRT [6]

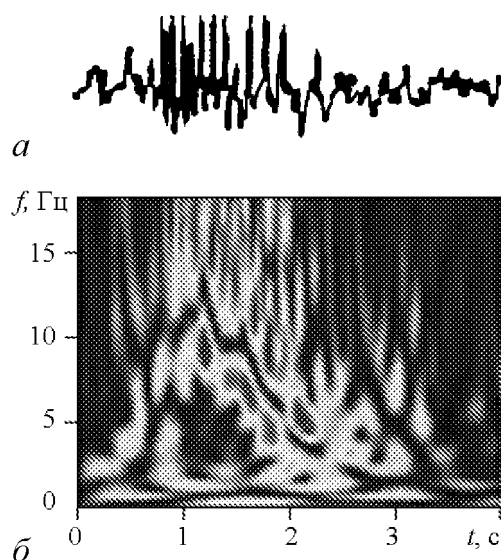


Рис. 2. Типичный высокоамплитудный разряд одного из видов эпилепсии [7]

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.

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

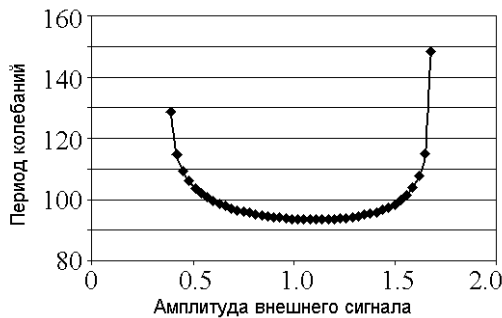


Рис. 3. Зависимость периода колебаний от амплитуды внешнего сигнала

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).

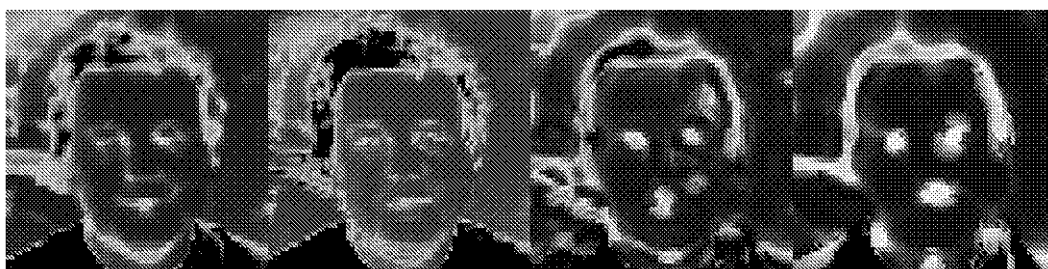


Рис. 4. Выделение объектов заданного размера из исходного изображения в нормальном режиме для переменной, соответствующей пирамидам коры

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.

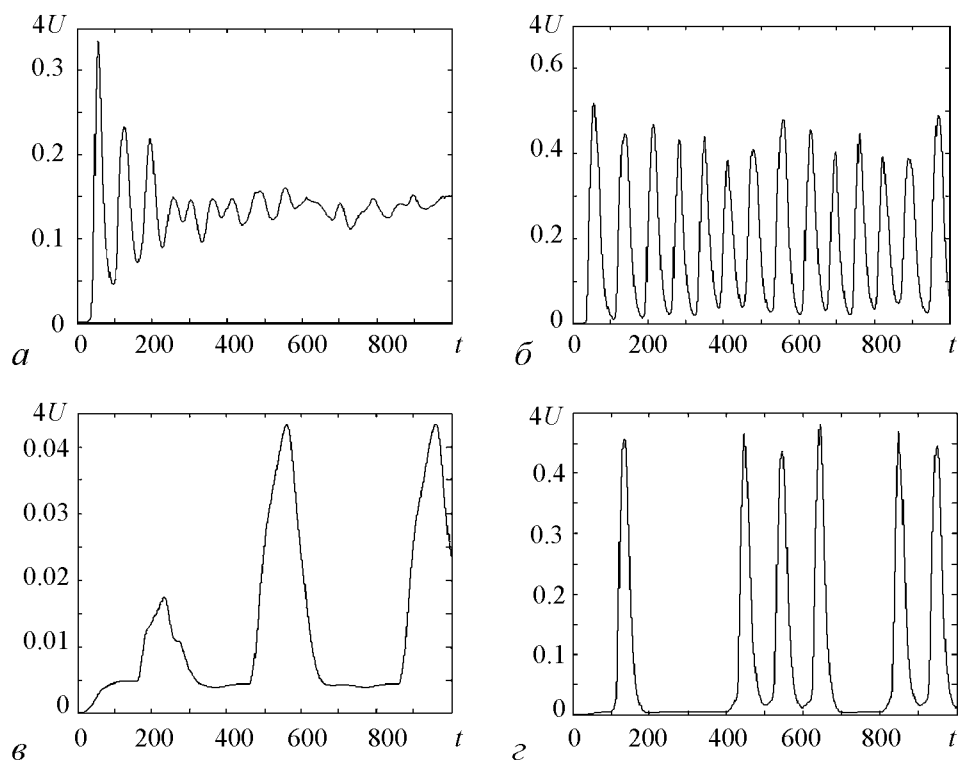


Рис. 5. Примеры суммарной временной активности коры

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, а-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

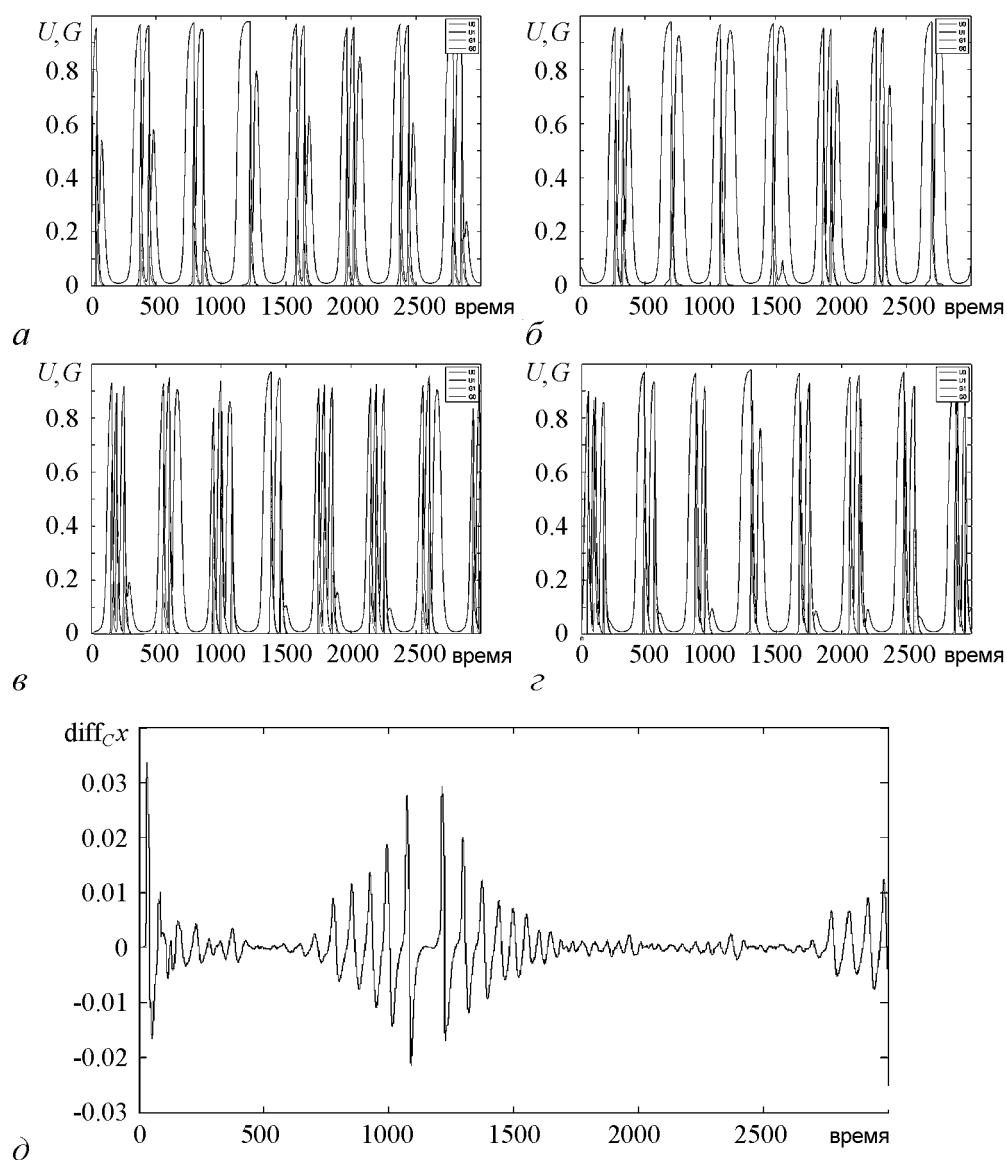


Рис. 6. *a–г* – зависимость интегральной активности четырех нейронных ансамблей коры от времени; *д* – дифференцированная по времени суммарная активность четырех нейронных ансамблей коры

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*).

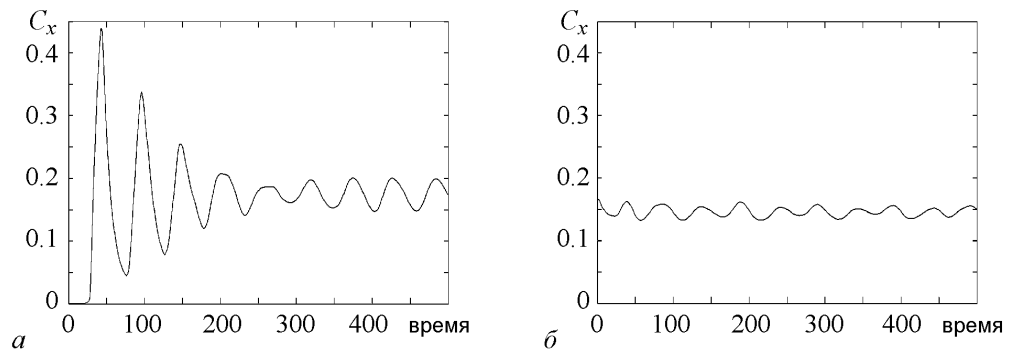


Рис. 7. *а* – суммарная активность в системе с нулевыми начальными условиями, *б* – ненулевые начальные условия

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



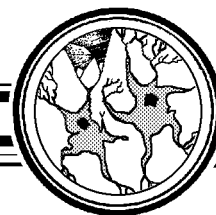
Нуйдель Ирина Владимировна – родилась в 1966 году. Закончила радиофизический факультет Горьковского государственного университета по специальности «Радиофизика и электроника» (1988). С 1990 года работает в ИПФ РАН. Имеет ученую степень кандидата наук (1998) и стаж работы в должности старшего научного 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



ОСНОВНЫЕ ДИНАМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ОСОЗНАНИЯ СЕНСОРНЫХ СИГНАЛОВ В НЕЙРОНОПОДОБНЫХ МОДЕЛЯХ: ПРОБЛЕМЫ НА ПУТИ К «НЕЙРОМОРФНОМУ» ИНТЕЛЛЕКТУ

В.Г. Яхно

Рассмотрены универсальные модели нейроноподобного типа, из которых конструируются системы преобразования и распознавания информационных сигналов в соответствии с заранее определенными целями. Модули разных уровней в модельной системе ориентированы на выполнение таких функциональных операций, которые характерны для живых систем. Приведенный набор базовых моделей и наиболее очевидные динамические режимы их функционирования могут адекватно описать известные экспериментальные данные об особенностях восприятия и реагирования живых систем на разнообразные сенсорные сигналы. Модели с биологически правдоподобной архитектурой используются для создания технических устройств (симуляторов), которые позволяют воспроизвести основные закономерности поведения живых систем.

Ключевые слова: Нейроноподобные модули, сознательное–бессознательное, оценка времени в «эпизодической памяти», динамика принятия решений, интуиция, когнитивные фильтры.

Введение

Необходимость формализованного описания механизмов обработки информации в мозгу человека и животных не вызывает сомнений. Сейчас активно проводятся разработки, ориентированные на имитацию динамических процессов управления в живых системах [1–21]. Какие элементы и в какой архитектуре взаимосвязей должны работать, чтобы такие симуляторы живых систем позволяли выполнять операции восприятия и осознания сенсорных сигналов с высокой точностью, а также осуществлять возможность накопления знаний об окружающей среде не хуже, чем это делают их аналоги в живой природе? На этом пути известны следующие проблемы:

- а) разработка базовых компьютерных и математических моделей с биологически правдоподобной архитектурой;
- б) исследование и классификация основных динамических режимов базовых моделей, проверка соответствия данным экспериментов;
- в) разработка версий симуляторов живых систем в заданных областях применения.

При решении выделенных проблем особо следует отметить важную роль выбора адекватной архитектуры используемых моделей, то есть обязательный учет в модельной схеме таких взаимодействий между элементами системы, которые позволят воспроизвести функциональные возможности, присущие живым системам. Из множества функциональных механизмов, реально действующих и обеспечивающих все необходимое разнообразие в поведении живых систем, представляются наиболее важными для изучения, моделирования и понимания следующие:

- В.1. Механизмы и варианты архитектуры обработки большого потока сенсорных данных, обеспечивающие возможность быстрого реагирования на фрагменты тех сенсорных данных, которые уже известны системе по ее прошлому опыту.
- В.2. Механизмы, особенности архитектуры преобразования и сопоставления внешних и внутренних сенсорных данных, позволяющие настроить, обучить систему на любой новый сенсорный сигнал, чтобы уметь эффективно распознавать его в дальнейшем.
- В.3. Механизмы внутренней иерархии сенсорных данных, позволяющие оптимизировать представление системы о внешнем мире и эффективно его использовать в дальнейшем функционировании.

Для этого используются широко известные к настоящему времени данные об архитектуре и функциональных операциях в управляющих нейронных сетях живых систем и соответствующих им базовых моделях. В ряде российских работ такие модели называются «нейроподобными», поскольку в них отражены и особенности архитектуры связей и характерная динамика обработки сигналов [1–4]. В тоже время в зарубежных исследованиях используют термин «нейроморфные модели» [6–8], что подразумевает аналогию в морфологической структуре взаимосвязей. Для надежной и устойчивой работы таких многоуровневых иерархических систем, важно чтобы при их конструировании использовался как можно меньший набор функциональных модулей (желательно универсальных) обеспечивающий, тем не менее, весь спектр необходимых операций для таких систем «нейроподобного», или «нейроморфного», интеллекта.

Цель данной работы состоит в рассмотрении основных базовых модулей, которые необходимо использовать при конструировании симуляционных систем, ориентированных на описание известного для живых систем набора функциональных операций (см. п. В.1.–В.3.). Показано, что выбранный набор функциональных моделей-модулей позволяет вводить определения и адекватно описывать многие экспериментальные данные о динамических режимах поведения нейроподобных систем. Например, определить и описать различные режимы осознанного и бессознательного восприятия сигналов, рассмотреть возможные механизмы восприятия времени, режимов «когнитивной слепоты» и ряда других известных для живых систем процессов реагирования.

1. Основные переменные

Рассмотрение проводится в рамках предположения, что все необходимые функциональные операции выполняются с помощью различного вида систем распознавания. Входные, выходные, а также межмодульные сенсорные сигналы представлены в виде изображений – таблиц чисел. Качество работы системы оценивается по точности принятых решений в соответствии с заданной целевой функцией, по набору

и динамике используемых системой внутренних «образов», а также времени выполнения операций. Используемые для конструирования нейроноподобные модули представляют собой универсальные модели, в которых преобразование и распознавание информационных сигналов происходит в соответствии с заданным набором требуемых функциональных операций.

«Модули 1-го уровня», представленные наборами однородных нейроноподобных систем, описывают режимы быстрого (параллельного) кодирования информационных сигналов (изображений), что соответствует выполнению функциональных операций, отмеченных в п. В.1. Обычно для таких процессов используются характерные нелинейные моды в распределенных сетях из активных (нейроноподобных) элементов. Динамические процессы преобразуют входные сигналы в наборы упрощенных изображений, которые в дальнейшем пересчитываются в наборы признаков для искомым объектов. Значимые признаки объектов отбираются в процедуре обучения (используется выборка примеров). Варианты реализаций модулей этого уровня приведены, например, в работах [1–5].

2. Простейшие когнитивные системы

Элементарные адаптивные распознающие системы с возможностями коррекции полученных ими ранее данных и знаний описываются «модулями 2-го уровня» (рис. 1) [4,13,15]. Распознающие модули такого типа ориентированы на выполнение функциональных операций, отмеченных в п. В.2. С их помощью можно формализовать описание различных режимов сознательного, бессознательного, интуитивного восприятия сигналов, предложить варианты механизмов восприятия времени о прошлых событиях и ряд других процессов, нечетко определенных в биофизике, медицине, лингвистике, философии и т.д. [22–31]. Для описания функциональных состояний «модуля 2-го уровня» используется, как минимум, следующий набор переменных:

- I_n – входной сенсорный сигнал (изображение), поступающий на обработку в распознающую систему;
- $Code_n$ – наборы векторов кодового описания входного сигнала;
- $Filter(I_n)$ – наборы фильтрующих масок, обеспечивающих наиболее точное распознавание входного сенсорного сигнала (изображения);
- Int_n – изображение, интерпретирующее входной информационный сигнал, которое генерируется распознающей системой из кодового описания входного изображения и соответствующих им фильтрующих масок;
- $A_n(En_n)$ – формализованное представление знаний в системе, включающих используемые идеи, методы, модели и алгоритмы для всех блоков в модуле (например, $A_{code}(En_n)$ – алгоритмы кодирования входного изображения в величинах $Code_n$ или $A_{decode}(En_n)$ – декодирования, когда из векторов $Code_n$ получают Int_n – изображение-интерпретацию);
- $Delta_n(Code_n)$ – вектор (или изображение) для величин ошибок (обычно используют термин «невязка»), которые определяют мотивационный сигнал и получены из сравнения наборов кодов входного изображения и кодовых описаний для предварительно ожидаемого системой изображения;
- D_n – решения, принятые распознающей системой;
- R_n – оценки уверенности, статистической достоверности принятого решения;

- *LogFiles* – кодовое описание состояний модуля (например, такты времени, индексы используемых алгоритмов, решения, оценки уверенности и т.д.);
- I_{n+1} – сигнал на выходе распознающего модуля, состоящий из набора величин $D_n, R_n, A_n(E_{n_n}), Int_n$;
- E_{n_n} – необходимые ресурсы для обеспечения активного состояния распознающего модуля при работе тех или иных алгоритмов; в самом простом случае этот параметр может описывать только одну величину – потребляемые энергетические ресурсы, требуемые для работы конкретного алгоритма.

После выполнения такта операций распознавания в модуле формируются выходные величины $I_{n+1}(Int_n, D_n, A_n(E_{n_n}), R_n)$ и $E_{n_{n+1}}$, которые передаются для взаимодействия с другими модулями в иерархической системе. Величина $E_{n_{n+1}}$ характеризует уровень созданных или оставшихся ресурсов модуля, которые определяются особенностями работы исполнительных механизмов, запускаемых на основе решения модуля D_n, R_n .

Основная отличительная особенность таких модулей (их архитектура показана на рис. 1) связана с возможностью создания в них внутренних имитационных представлений («внутренних представлений» или «внутренних имитаций») входного сигнала. С их помощью реализуется вычисление дополнительных признаков информационного сигнала, появляется возможность выполнения операций для оптимизации принимаемых решений в последующий период, когда входной сигнал уже отсутствует, а также возможность обмена «имитациями» входных сигналов между взаимодействующими «модулями 2-го уровня». Также модули описывают простейшие психологические режимы реагирования распознающей системы. «Модули 2-го уровня» могут строиться из «модулей 1-го уровня». Возможность совместного функционирования подсистемы кодирования и дополнительной подсистемы «внутренней имитации», восстановление ожидаемого входного сенсорного сигнала (опережающего отражения действительности) и циклические (или рекурсивные) процессы позволяют обеспечить выбор наиболее подходящей фильтрующей маски на входное изображение, а также подобрать наиболее точно работающий алгоритм кодирования «информационного объекта». Фильтрующие маски позволяют убрать из входного изоб-

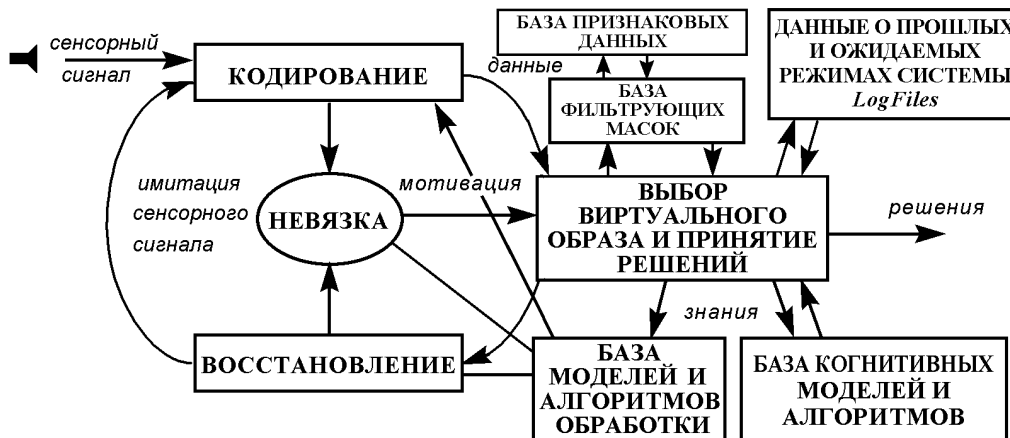


Рис. 1. Модель простейшей распознающей системы, архитектура которой позволяет имитировать (осознавать) входной сигнал (варианты этой схемы обсуждались в работах [4,13,15]). Динамические режимы состояния модели управляются целевыми функциями в блоке «Выбор виртуального образа и принятие решений» на основе сигнала из блока «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы»

ражения мешающие «шумовые» фрагменты и, тем самым, оставить на изображении в основном фрагменты, относящиеся к «информационному объекту». Наиболее точно работающий алгоритм кодирования исследуемого «информационного объекта» выбирается в результате циклического динамического режима кодирования – восстановления, ориентированного на минимизацию величины невязки, вычисленной при сравнении ожидаемого системой сигнала с фактическим на ее входе (см. рис. 1). Такой процесс оптимизации (циклы настройки) и повышения точности работы распознающей системы, связанный с выбором адекватных алгоритма кодирования и фильтрующей маски, можно определить как *элементарный процесс осознания* образа входного информационного сигнала.

Важно обратить внимание, что такая распознающая система «осознает» именно ту свою внутреннюю интерпретацию Int_n , которая лучше всего соответствует входному сенсорному сигналу. Такое определение процесса «осознания» позволяет снять встречающиеся элементы многозначности и путаницы при использовании термина «сознание». Только не следует забывать, что обычно эксперименты проводят с реальными иерархическими системами. Поэтому полное соответствие вводимых определений для «модуля 2-го уровня» описаниям и результатам работ [22–31] возможно лишь при рассмотрении всех необходимых для этого переменных в иерархической архитектуре. Об этих переменных пойдет речь в разделе 3 этой статьи.

Бессознательная обработка входного сигнала соответствует случаям отсутствия циклов, когда решение принимается без дополнительных проверок и используется наиболее оптимальный (точный) режим работы, который уже был найден и проверен в предыдущем опыте работы модуля. Важной интегральной характеристикой распознающего модуля является зависимость величины «мотивирующего» сигнала (по которому принимается решение) от величины невязки, вычисленной при сравнении ожидаемого и фактического сигнала на входе системы (рис. 2). Если величина полученной невязки оказывается меньше значения первого порога H_1 , то система принимает «бессознательное» решение. Таким образом, режимы бессознательной обработки и принятия решений опираются на позитивный предыдущий опыт функционирования распознающей системы, когда используются все необходимые данные для точного распознавания объектов.

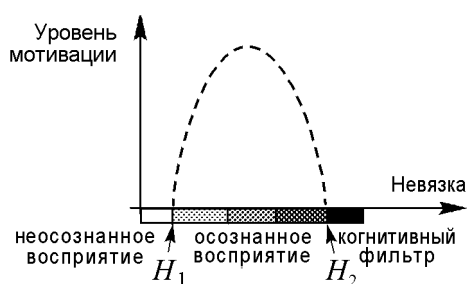


Рис. 2. Выбор режима распознающей системы в зависимости от величины невязки. Только в диапазоне значений между H_1 и H_2 величина мотивации определяет выбор режима оптимизации в наборе используемых алгоритмов классификации входного сигнала («осознанное» восприятие)

При величинах невязки больше второго порога H_2 система не воспринимает входной сигнал. В этом режиме работает «когнитивный фильтр». Он блокирует входной сигнал, а распознающий модуль принимает «бессознательное» решение об отсутствии такого входного сигнала. Система не замечает входной сенсорный сигнал, например, для экономии ее ресурсов. Работа «когнитивных фильтров» проявляется в широко распространенных случаях «когнитивной слепоты» живых систем на определенные наборы входных сигналов. Под названием «когнитивная слепота» объединяется множество

феноменов восприятия. Общим для этих феноменов является следующее: все они демонстрируют, что живые системы видят на самом деле меньше, чем им кажется, что они видят. Значения порогов H_1 и H_2 зависят от предыдущего опыта, целевых функций и характера взаимодействия с другими распознающими модулями в полной иерархической системе.

Величина невязки в диапазоне порогов между H_1 и H_2 приводит к запуску операций настройки системы с использованием «внутренней имитации» ожидаемого или предполагаемого входного сигнала, циклических процессов сравнения с входным сенсорным сигналом и выбором наиболее оптимального решения. Определение такого режима как *элементарного режима «осознания»* входного образа сигнала в модельной системе соответствует всем известным автору экспериментальным данным. Величину мотивации в этом случае можно использовать в выборе наиболее эффективной, на основе предыдущего опыта, оптимизационной процедуры. Циклическая обработка, в первую очередь, ориентирована на компактное описание образа в пространстве признаков, формирование фильтрующих масок на шумовые области входного изображения и вычисление дополнительных признаков сходимости рекурсивной процедуры настройки. В блоке «Выбор виртуального образа и принятие решений» вычисляются также и интегральные оценки, определяющие уровень «достоверности», надежности принятого решения. Эти оценки связаны с описанием одной из компонент «эмоций» в системе. Определяющую роль в процессе настроек, «осознания» распознаваемого образа, играет используемый набор моделей, обеспечивающий наиболее точную классификацию исследуемого образа. Важно также, чтобы время $T_{\text{созн}}$, требуемое на выполнение операций «осознания», было меньше, чем требуется обстановкой, в которой работает система, для реакции на входной сигнал. Нарушение упомянутого ограничения приведет к запуску дополнительных «контролирующих» модулей из иерархической архитектуры, например, модуля оценки «стресса и шока» (см. раздел 3). Поскольку при бессознательной обработке работает только алгоритм кодирования сигнала, то время такой бессознательной реакции $T_{\text{бессозн}}$, естественно, меньше $T_{\text{созн}}$. Бессознательные режимы, в первую очередь, формируются для распознавания объектов, на которые система уже была хорошо обучена в предыдущем опыте. При этом невязка между ожидаемой имитацией и реальным входным изображением объекта меньше первого заданного порога H_1 , а циклическая обработка, ориентированная на настройку алгоритмов на входное изображение и связанные с ним фильтрующие маски, уже не требуется. Интегральные оценки, «эмоции», не вычисляются и, следовательно, «осознание» сенсорного сигнала отсутствует. В рамках модельной архитектуры, изображенной на рис. 1, могут быть рассмотрены разные варианты бессознательных режимов, связанные с работой блока, сохраняющего «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы».

В этой подсистеме формируется индексное описание состояний всего «модуля 2-го уровня» в прошлом и планируемых операций в ожидаемый период времени (рис. 3). Фактически, эта подсистема выполняет операции, аналогичные эпизодической памяти в живой системе,

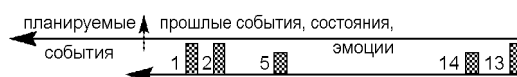


Рис. 3. Пример схемы кодирования состояний модуля в блоке «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы» – аналог «эпизодической памяти» в живых системах. Цифрами пронумерованы используемые алгоритмы, а высота столбиков отражает величины невязок, которые определяют мотивационный сигнал и характеризуют уверенность в принятом решении

и позволяет обеспечивать автономное функционирование в рамках заданных сценариев. Например, обращение к этому виду памяти за информацией о прошлых событиях позволяет реализовать сценарий минимизации ошибок принятия решений на основе имеющегося у нее опыта. Однако естественно предполагать существование, как минимум, двух этапов в работе системы: а) выполнение целевого задания; б) анализ результатов выполнения целевого задания.

На этапе анализа уже полученных результатов система имеет возможность возвращаться к результатам прошлых событий и оптимизировать процедуры анализа, классификации и принятия решений. Для выбора событий, которым требуется оптимизация, используются величины невязок, записанные в блоке «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы». На рис. 3 они продемонстрированы высотой столбиков на оси прошлых событий. На этапе анализа точности выполнения прошлых действий в блоке «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы» может осуществляться выбор событий по которым требуется дополнительная коррекция. Для этого используется некоторый заданный порог $H_{эп}$ – порог в «эпизодической памяти». При этом подсистема «Выбор виртуального образа и принятия решений» может включать необходимые процедуры оптимизации алгоритмов распознавания для состояний, у которых невязка больше $H_{эп}$. Таким образом, проводится «дообучение» системы. Фактически, через такую процедуру анализа система может реализовать один из сценариев формирования целевой функции – «стимул жизни», заключающийся в увеличении точности работы алгоритмов системы на основе анализа случаев недостаточно точного принятия решений в прецедентах прошлого опыта. Как видно, использование архитектуры «модулей 2-го уровня» позволяет рассмотреть широкий набор динамических процессов, связанных с «сознательными» или «бессознательными» режимами работы. Кроме того, по характеристикам планируемых (ожидаемых) событий в блоке «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы» можно определять показатели ответственности, уровень «активной жизненной позиции» распознающего модуля. На рис. 3 приведен пример пассивного, нечего не предсказывающего, можно сказать, «безответственного» модуля.

Важно отметить, что время $T_{эп}$, определяющее шаги (временные интервалы) между событиями, которые анализируются в «эпизодической памяти», уже не будет соответствовать реальным интервалам времени в прошлом. Например, если на рис. 3 лишь события, использовавшие алгоритмы 1, 2 и 13 превысили порог $H_{эп}$, то оценки интервалов «внутреннего времени» $T_{эп}$ между событиями 1–2 и 2–13, будут одинаковыми (то есть $T_{эп}[1(-)2] = T_{эп}[2(-)13]$). Следовательно, «внутреннее время» прошлых событий на рис. 3 будет оцениваться как состоящее из следующих времен: $T_{созн}[1] + T_{эп}[1(-)2] + T_{созн}[2] + T_{эп}[2(-)13]$. Эти характерные времена с определяющими их совместную работу процессами, по-видимому, и будут составлять тот единый механизм, который определяет осознание «внутреннего времени» происходящих событий в системах с рассматриваемой архитектурой.

Кроме того, дополнительные признаки-индексы в подсистеме «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы» могут быть использованы другими распознающими «модулями 2-го уровня» для формирования «второй сигнальной системы» – языка описания входных и внутренних сенсорных сигналов. Фактически, эти дополнительные «модули 2-го уровня» обеспечивают выполнение операций, связанных с логической обработкой входных информационных сигналов (см., например, [9, 10]).

Использование распознающих систем с архитектурой «модулей 2-го уровня» позволяет также предложить определение, в котором выделен функциональный признак отличия интуитивных решений от бессознательных в полном соответствии с известными психофизическими данными. Определим, что основной признак интуитивных процессов связан с возможностью правильного принятия решения в условиях полного отсутствия у системы предыдущего опыта решения задачи (распознавания объекта). Система впервые решает задачу, и после некоторого промежутка времени отсутствия решения «неожиданно» находится алгоритм, позволяющий решить рассматриваемую задачу. В «бессознательных» режимах, наоборот, для обработки сигналов используются уже существующие в системе данные о распознаваемом объекте. Они были получены системой ранее в предыдущем опыте ее работы. Система уже хорошо обучена на распознавание объекта и без дополнительной оптимизации (то есть «бессознательно») находит правильный ответ. В механизме интуитивного решения, как видно из схемы на рис. 1, обязательно должен существовать канал передачи новых данных, новых «знаний», в распознающий модуль. Для этого необходимо взаимодействие с другими распознающими модулями. Причем сам факт передачи в модуль новых данных, новых «знаний», не фиксируется в блоке «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы». Таким образом, на первой фазе процесса распознающий модуль не может найти решение и в нем формируется большая невязка между желаемым и реальным сигналом. При этом мотивационный сигнал запускает переменную «эмоции», что приводит к «ощущению стресса». На второй фазе модуль получает алгоритм решения извне и при очередном сканировании проблем в блоке «Данные о прошлых и ожидаемых режимах системы» «неожиданно» (важный признак интуитивного решения) находит решение проблемы, невязка уменьшается ниже заданного порога принятия решения, напряжение от «ощущения стресса» в модуле снимается. Рассмотрение возможных вариантов реализации таких процессов и обсуждение методик их экспериментальной регистрации выходит за рамки данной статьи. Заметим только, что, с приведенной здесь точки зрения, описание понятия «интуиции» в ряде работ (например, [9,10]), скорее следует отнести к «бессознательно-ассоциативным» режимам принятия решений.

Итак, рассмотренные модели позволяют ввести определения и формализовать описание процессов, которые определяют выполнение когнитивных операций. К ним относятся те, которые направлены на изменение объема и качества работы «знаний» системы, а также объема данных в подсистемах «База признаковых данных» и связанных с ними «Базой фильтрующих масок», «Базой моделей и алгоритмов обработки», «Базой когнитивных моделей и алгоритмов», и в подсистеме «База данных о прошлых и ожидаемых режимах системы». Те когнитивные операции, которые приводят к увеличению точности принятия решений, можно считать положительными, а к повышению ошибочных решений – деструктивными.

Кроме того, сопоставление архитектуры и возможных динамических режимов работы «модулей 2-го уровня» с известными автору данными о поведении живых систем, позволяет постулировать утверждение: *определяющий признак живой системы заключается в возможности внутренней интерпретации распознающей системой входного сигнала и использовании этой интерпретации для оптимизации текущего решения на основе прошлого опыта.* При этом оптимизация текущего решения реализуется в тех динамических процессах, которые аналогичны сознательному, бессознательному или интуитивному принятию решений, оценкам времени в «эпизо-

дической памяти», внутренней динамике выбора целевых функций, использованию когнитивных фильтров и других процессов, свойственных живому. Для более подробного обоснования сформулированного утверждения требуются дополнительные обсуждения.

Проблемы ближайшего будущего при создании симуляторов живых систем связаны с реализацией задач в следующих весьма объемных областях исследований и разработок:

- разработка аналитических методов и компьютерных моделей для исследования динамических режимов работы «модулей 2-го уровня»;
- изучение и классификация основных динамических режимов при работе с «модулями 2-го уровня» согласно данным соответствующих экспериментов [26, 27] (включающих «бессознательные» реакции, «сознательную» настройку, уходы в состояние блокировки входного сигнала «когнитивными фильтрами», разные комбинации с переключениями между такими состояниями и т.п.);
- разработка демонстрационных программ для выделения набора заранее заданных объектов [11], формирование описания «сцен» на изображениях, формирования «целевых функций» системы на основе прошлого опыта ее работы и т.д.;
- разработка версий симуляторов для наиболее важных прикладных операций, воспроизводящих способности живых систем (см., например, [11–14]).

Понятно, что в каждом из перечисленных пунктов содержится широкий спектр задач с детализацией в зависимости от характера приложений.

Все этапы приведенного здесь формализованного описания соответствуют известному набору экспериментальных данных и снимают элементы многозначности и путаницы при использовании их в медицине, лингвистике, философии и т.д. [22–31].

3. Иерархические когнитивные системы

Следующий шаг, соответствующий требованиям биологической правдоподобности базовых моделей, связан с необходимостью рассмотрения модулей с иерархической архитектурой [9,10,12–15] из простейших «когнитивных систем». Этот уровень модельного описания получил название «модули 3-го уровня». Их архитектура состоит из иерархии взаимодействующих элементарных распознающих «модулей 2-го уровня». Тогда описание входных сигналов (изображений) по какому-либо выбранному сенсорному каналу должно проводиться на различных понятийных уровнях L (на каждом уровне могут работать несколько однотипных «модулей 2-го уровня»).

Такие модели позволяют описывать более сложные когнитивные процессы, происходящие на высших уровнях управления поведением живых систем (см. п. В.3 на стр. 131). Для описания состояний и анализа процессов обработки сенсорных сигналов в таких системах необходимо оперировать уже с иерархическими наборами образов. Используя теорию графов*, в такой иерархической архитектуре полное модельное описание состояний распознающего «модуля 3-го уровня» должно основываться на рассмотрении переменных, включающих описание на всех L понятийных уровнях:

*См., например, <http://book.itep.ru/10/grap1021.htm>.

- граф величин мотивации $\Delta_{L_n}(Code_{L_n})$;
- графы загруженных алгоритмов $A_{L_n}(En_{L_n})$ и фильтрующих масок $Filter_{L_n}(I_{L_n})$, характеризующие процесс внимания;
- графы процессов сознательной или бессознательной обработки, определяемые наборами соответствующих алгоритмов $A_{code}(En_n)$, $A_{decode}(En_n)$ и временами $T_{L_{consci}}$, $T_{L_{unconsci}}$ их срабатывания;
- графы D_{L_n} для принятых решений.

Для модельного описания автономных свойств живых систем (способность ориентироваться, в основном, на внутренние информационные и энергетические ресурсы) необходимо использовать распознающие модули, которые могут формировать интегральные модельные представления о внешней ситуации и о возможных состояниях всей иерархической системы (модуль самоосознания системы). Эти модули собирают, обрабатывают и принимают решение по набору самых необходимых показателей, которые в выбранной конкретной ситуации характеризуют интегральное состояние иерархической системы. Этот процесс контроля модулей верхних уровней над состоянием и функционированием модулей нижних уровней можно определить как понятие, которое в психологии связывают с функционированием того «нечто», что ассоциируется с «Я» – ЕГО всей автономно выделенной живой системы. В модуле «Я» предполагается одновременная работа распознающих систем, связанных с алгоритмами описания следующего набора сценариев поведения: «учитель», «взрослый», «ребенок» [15]. К ним, как видно из экспериментов, следует добавить систему для распознавания, предсказания оценки уровня «безопасности–опасности» текущего состояния системы при выполнении заданного набора операций.

Как показывает анализ психофизических данных, объем потока информационных сигналов к блоку «Я», по-видимому, определяется той ситуацией, в которой работает живая система, и осознавать она может только те сигналы из поступающего в него интегрального потока, которые пропустит фильтр на входе модуля «Я». Именно поэтому в интегральной иерархической системе оптимизационные процессы анализа прошлых ошибочных решений могут восприниматься в блоке «Я» как в «сознательном», так и в «бессознательном» режимах. При этом, в каждом из ниже лежащих модулей анализ прошлых ошибочных решений из «эпизодической» памяти происходит в «сознательном» режиме.

Для более реалистичной интерпретации экспериментальных наблюдений и данных на основе модельных представлений необходимы их дальнейшие уточнения. Они связаны с формированием следующего уровня иерархии из взаимодействующих «модулей 3-го уровня». Данные экспериментов указывают, что в живых аналогах осуществляется совместное функционирование, как минимум, четырех однотипно устроенных модулей (см., например, [13]):

- а) информационный модуль – формирование моделей и принятие решений по сигналам от различных информационных каналов (в живых системах к известным сенсорным каналам, например, относятся: зрительная система, слуховая система, кожная и вкусовая системы, система обоняния, интерорецепция, вестибулярная система);
- б) мышечный модуль – управление функциональным состоянием исполнительных механизмов;
- в) эмоциональный модуль – вычисление интегральных оценок для состояний или выполняемых операций модулей (шкалы «комфорт-дискомфорт», «сила-слабость» и т.п.);
- г) вегетативный модуль – управление уровнями энергетического обеспечения.

Было показано, за счет взаимодействия определенных элементов «эмоционального» и «вегетативного» модулей выполняется очень важная для живых систем функция реагирования, связанная с процессами «стресса и шока» [17,18]. Поэтому в разрабатываемом симуляторе живых систем необходимо специально выделять такой модуль и изучать его роль в управлении поведением и принятием решений.

Автономное функционирование таких многомодульных систем определяется целевым сценарием, направленным на снижение ошибок между внутренними предсказаниями, ожидаемыми величинами сигналов и реальным потоком входных сенсорных сигналов. Эти ошибки определяют величины в графе мотиваций и соответственно влияют на уровень «тревожности» в эмоциональном модуле.

Многомодульные системы могут быть настроены на выполнение операций с образами и ассоциативным принятием решений («правополушарные» функции), с детальным описанием внутренней конструкции образов («левополушарные» функции), либо на совместную работу «лево- и правополушарных» систем.

Количественная оценка «интеллекта» таких многомодульных распознающих систем определяется числом используемых алгоритмов для выполнения заданной операции и точностью ее выполнения в заданной области обрабатываемых данных.

При конструировании устройств, симулирующих потребности и поведение человека в соответствии с данными практических психологов (см., например, [29–31]), следует, как минимум, включать группы распознающих модулей, приведенные в таблице.

Реализация распознающих систем, ориентированных на анализ и обработку данных об известных ситуациях и сценариях поведения, перечисленные в таблице, позволит формализовать описание индивидуальной динамики состояний людей, их действий, а также повысить точность прогноза результатов их взаимодействия. Это необходимо для того, чтобы люди, в первую очередь, научились понимать самих себя, видеть механизмы формирования их мотиваций и оценивать гармоничность работы имеющихся у них распознающих модулей (хотя бы тех, которые приведены в демонстрационном перечне – второй столбец в таблице).

Круг проблем, связанный с исследованием возможных режимов функционирования «модулей 3-го уровня», весьма широк, и его конкретизация определяется планируемыми областями применения разрабатываемых симуляторов. Приведем некоторые из них.

- Исследование динамики взаимодействия многих агентов (в виде «модулей 2-го уровня») при различном объеме их «знания», опыта работы, вида целевых функций и других характеристик. Результаты ориентированы на оценку уровня возможной эффективности коллективной работы в социальных группах, характеристик «когнитивной слепоты» агентов и возможных последствий их взаимодействия.
- Разработка основных распознающих систем в «модулях 3-го уровня» для описания психологического портрета человека. Это позволит сделать реальным проект «цифрового двойника человека». Результат ориентирован на возможность формализации данных в психологических исследованиях, а также на проведение индивидуальной медицинской диагностики человека.
- Проблемы, связанные с разработками и применением адаптивных, «интеллектуальных» систем.

Таблица

Типы модулей	Области действий распознающих модулей [29–31]	Соответствующие группы людей с разными жизненными интересами [29–31]
I. Набор распознающих систем, определяющих состояние и поведение индивидуального устройства (человека).	I.a. Действия индивида в экстремальных ситуациях. I.б. Действия индивида в обычных жизненных ситуациях.	I.a. Наемники, киллеры, профессиональные преступники, оперативные работники спецслужб, пожарные, верхолазы и т.д. Сопереживающие болельщики футбола, боев без правил, гонок и пр. острых зрелищ и т.д. I.б. Посетители курортов, пляжей, домов отдыха, выставок, баров, дискотек, вечеринок, презентаций, концертов популярных артистов.
II. Набор распознающих систем, определяющих поведение устройства во взаимоотношениях с себе подобными (человек – общество).	II.a. Властные действия индивида в отношении к себе подобным, ответственность за других. II.б. Восторженное, лирическое, милосердное или романтическое восприятие мира.	II.a. Политики и общественные деятели, администраторы, руководители предприятий, домашние деспоты и т.д. (люди, стремящиеся любой ценой ощутить власть). II.б. Посетители фестивалей, где можно попеть, послушать песни бардов, встретить восход солнца, почитать стихи, послушать романтического проповедника и т.д. (люди, часто не понимающие реалий нашей жизни, плохо адаптированные к ней).
III. Набор распознающих систем, определяющих понимание устройством его взаимоотношений с внешним миром (человек – внешний мир).	III.a. Созидание нового, творчество. III.б. Духовное развитие и познание мира. III.в. Выполнение специальных ритуалов, трактуемых как общение с Богом.	III.a. Ученые, исследователи, художники, поэты, писатели, музыканты, скульпторы и т.д. (созидатели чего-то нового). III.б. Люди, заботящиеся о своем внутреннем развитии и познании Истины, мистики, экстрасенсы, эзотерики, шаманы, предсказатели, гадалки, маги и т.д. (духовные искатели). III.в. Верующие разных религиозных традиций.

Выводы

Приведенный набор базовых модулей и перечень наиболее очевидных динамических режимов их функционирования показывает, что известные экспериментальные данные об особенностях восприятия разнообразных сенсорных сигналов и реагирования на них живых систем могут быть адекватно описаны с помощью предложенного формализованного подхода. Архитектура модулей определяет структуру алгоритмов управления возможными техническими устройствами, симулирующими поведение их живых аналогов. Режимы осознания входного сигнала используются для настройки и повышения точности принятия решений распознающими модулями на различных уровнях обработки. Неосознанные процессы позволяют быстро классифицировать информационный сигнал и реализовать автоматические действия

в соответствии с ранее полученным опытом. Иерархическая архитектура распознающих модулей позволяет настроить всю модельную систему на использование ее опыта в прошлом для оптимальных решений в текущий момент, делает ее устойчивой к разнообразию внешних воздействий. Изучение возможных динамических режимов и их классификация для приведенных базовых модулей сейчас относится к одной из актуальных задач в области разработок симуляторов живых систем. Объем планируемых работ, конечно же, очень большой. Однако, существующие уже сейчас версии модельных описаний и разработки элементов таких систем [9–21] вселяют оптимизм. Нужен разумный и заинтересованный заказчик. Имеется реальная основа для конструирования разных версий симуляторов живых систем, с учетом их индивидуальных настроек.

Работа выполнена при поддержке Программ Президиума РАН «Фундаментальные науки в медицине», «Фундаментальные проблемы нелинейной динамики» и гранта РФФИ 11-07-12027-офи-м-2011.

Библиографический список

1. *Мастеров А.В., Рабинович М.И., Толков В.Н., Яхно В.Г.* Исследование режимов взаимодействия автоволн и авгоструктур в нейроноподобных средах. Коллективная динамика возбуждений и структурообразование в биологических тканях / Горький: ИПФ АН СССР, 1988. С. 89.
2. *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.
3. *Yakhno V.G., Bellustin N., Krasil'nikova I., Kuznetsov S., Nuidel I., Panfilov A., Perminov A., Shadrin A., Shevyrev A.* Research system of decision making by composite image fragments using neuron-like algorithms // *Radiophysics & Quantum Electronics*. 1994. Vol. 37. P. 625.
4. *Яхно В.Г.* Модели нейроноподобных систем. Динамические режимы преобразования информации // *Нелинейные волны – 2002* / Отв. ред. А.В. Гапонов-Грехов, В.И. Некоркин. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2003. С. 90.
5. *Xiao-Jing Wang.* Neurophysiological and computational principles of cortical rhythms in cognition // *Physiol. Rev.* 2010. Vol. 90, № 3. P. 1195.
6. An overview of neuromorphic systems. <http://www.neuromorphicblog.com/?p=28>
7. Fopofolu Folowosele Neuromorphic Systems: Silicon neurons and neural arrays for emulating the nervous system // *Neurdon*. 2010. August, 12. <http://www.neurdon.com/2010/08/12/>
8. *Leslie S. Smith.* Neuromorphic systems: Past, present and future// http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=neuromorphic%20system&source=web&cd=4&ved=0CDcQFjAD&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.187.6804%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ei=vKLHTo_ZNorDswbNoo3-Bg&usg=AFQjCNFZQHM7iBmD5EG8vPapNyOOL69cTQ&cad=rjt

9. Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П., Чернавская О.Д. Схема конструкции из нейропроцессоров, способной реализовать основные функции мышления и научного творчества // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 21.
10. Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П. О роли понятий «образ» и «символ» в моделировании процесса мышления средствами нейрокомпьютинга // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2011. Т. 19, № 6. С. 5.
11. Тельных А.А. Математические модели нейроноподобных сред для разработки систем обнаружения и распознавания объектов заданных классов. Дис... канд. физ.-мат. наук / М.: МФТИ, 2009. 125 с.
12. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2008. 359 с.
13. Яхно В.Г., Полевая С.А., Парин С.Б. Базовая архитектура системы, описывающей нейробиологические механизмы осознания сенсорных сигналов // Когнитивные исследования / Под ред. Ю.И. Александрова, В.Д. Соловьева. М.: Изд-во «Институт психологии РАН», 2010. Вып. 4. С. 273.
14. Станкевич Л.А. Моделирование мышления и когнитивные многоагентные системы нейробиологические системы // XI Всесоюзная конференция «Нейроинформатика – 2009»: Сб. науч. тр. М.: МИФИ, 2009. Ч. 2. С. 208.
15. Яхно В.Г. Динамика нейроноподобных моделей и процессы «сознания» // VIII Всероссийская науч.-тех. конф. «Нейроинформатика – 2006»: Лекции по нейроинформатике. М.: МИФИ, 2006. С. 88.
16. Эрик Берн. Игры, в которые играют люди. Психология человеческих отношений. Люди, которые играют в игры. Психология человеческой судьбы / Пер. с англ. Общ. ред. М.С. Мацковского; Послес. Л.Г. Ионина и М.С. Мацковского. СПб.: Лениздат, 1992. 400 с.
17. Парин С.Б., Яхно В.Г., Цверов А.В., Полевая С.А. Психофизиологические и нейрохимические механизмы стресса и шока: Эксперимент и модель // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород: Изд-во ННГУ, 2007. № 4. С. 190.
18. Парин С.Б. Роль эндогенной опиоидной системы в формировании экстремальных состояний. Дис... д-ра б. наук / М., 2011. 491 с.
19. Самсонович А.В. Метакогнитивные архитектуры как новая парадигма в моделировании мозга и мышления // XIII Всероссийская научно-техническая конференция «Нейроинформатика–2011»: Лекции по нейроинформатике. М.: НИ-ЯУ МИФИ, 2010. 130 с.
20. Сайт стратегического общественного движения «Россия 2045».
<http://www.2045.ru/>
21. Кабаков Б.Л. А mouse – виртуальная мышшь-анимат, программа-симулятор.
<http://www.animatlab.ru>
22. Величковский Б.М. Когнитивная наука. Основы психологии познания. М.: «Смысл», 2006. В 2-х томах.
23. Иваницкий Г.Р. XXI век: Что такое жизнь с точки зрения физики // УФН. Т. 180, № 4. Р. 337.

24. *Реутов В.П., Шехтер А.Н.* Как в XX веке физики, химики и биологи отвечали на вопрос: Что есть жизнь? // УФН. 2010. Т. 180, № 4. Р. 393.
25. *Рабинович М.И., Мюезинову М.К.* Нелинейная динамика мозга: Эмоции и интеллектуальная деятельность // УФН. 2010. Т. 180, № 4. Р. 371.
26. *Полевая С.А.* Интегративные принципы кодирования и распознавания сенсорной информации. Особенности осознания световых и звуковых сигналов в стрессовой ситуации // Вестник НГУ. 2008. Т. 2, вып. 2. С.106.
27. *Полевая С.А., Парин С.Б., Стромкова Е.Г.* Психофизическое картирование функциональных состояний человека // Экспериментальная психология в России: Традиции и перспективы / Под ред. В.А. Барабанщикова. М.: Изд-во «Инст. психологии РАН», 2010. С. 534.
28. *Дилтс Р.* Фокусы языка. Изменение убеждений с помощью НЛП. СПб.: Питер, 2002. 320 с.
29. *Маслоу А.* Мотивация и личность. 3-е изд. / Пер. с англ. СПб.: Питер, 2008. 352 с.
30. *Раджниш Б.Ш.* Ошо – психология эзотерического. М., 2004. 160.
31. *Свияш А.* Проект «Человечество»: Успех или неудача? Размышления о людях и их странном поведении. М.: АСТ: Астрель, 2006. 286 с.

*Институт прикладной физики РАН
Нижний Новгород*

Поступила в редакцию 8.12.2011

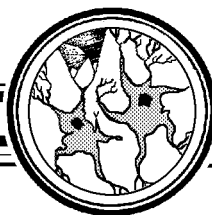
DYNAMIC MODES OF THE SENSOR SIGNAL CONSCIOUSNESS IN NEURON-LIKE MODELS: WAYS TO THE «NEUROMORPHIC» INTELLECT AND PROBLEMS

V.G. Yakhno

Universal models of neuron-like type, from which the systems of transformation and identification of information signals are constructed in accordance with pre-determined goals are considered. The models of different levels in a model system are aimed at performing functional operations characteristic of live systems. The presented set of base models and the most obvious dynamic modes of their operation can adequately describe the features of conscious perception and response of live systems to various sensor signals. The models with biologically inspired architecture are used for the creation of technical devices (simulators) which permit one to reproduce the main features of the behavior of live systems.

Keywords: Neuron-like modules, consciousness–unconsciousness, time estimation in episodic memory, making decision dynamics, intuition, cognitive filters.

Авторские сведения Яхно В.Г. см. на стр. 129.



К ВОПРОСУ О МОДЕЛИРОВАНИИ И АНАЛИЗЕ ИК-ТЕРМОКАРТ ГОЛОВНОГО МОЗГА ЧЕЛОВЕКА

А.В. Макаренко, А.В. Правдивцев, М.Г. Воловик

В настоящей статье представлены подходы и методы моделирования и анализа ИК-термокарт открытой коры головного мозга человека, которые направлены на решение основной задачи: выделение надежных информативных признаков, по которым возможно обнаружить патологию головного мозга, классифицировать ее тип, и очертить ее границы. Создаваемый аналитический инструментарий также ориентирован на изучение фундаментальных проблем, связанных с механизмами ауторегуляции и компенсации в головном мозгу. Излагаемые методы и подходы апробированы на реальной истории заболевания. Полученные результаты подтвердили правильность идей и работоспособность моделей и алгоритмов.

Ключевые слова: ИК-термокарта, кора головного мозга, моделирование, идентификация.

Введение

ИК-термокартирование открытой коры головного мозга в ходе нейрохирургических операций доказало высокую информативность и достоверность метода в оценке ее функционального состояния [1, 2]. Особенно перспективными представляются тепловизионные исследования мозговой ткани, граничащей с опухолью (перитуморальная зона), ибо она подвергается наибольшему влиянию со стороны патологического процесса, вследствие чего в ней нарушаются механизмы регуляции кровотока.

В известных нам отечественных и зарубежных работах по локальной церебральной гемодинамике варианты нарушений регуляции локального артерио-венозного кровотока в перитуморальной зоне опухолей остались вне поля зрения ученых. Отсутствует единая, простая и удобная в применении методика функционального тестирования, адекватно, быстро, неинвазивно отражающая регуляторный резерв локального кровотока [3].

Холодовая проба – один из распространенных тестов, используемых для функциональной оценки микрососудистого русла. Он связан с созданием локальной гипотермии ткани в зоне ее контакта с охлаждающим агентом, низкая температура

которого поддерживается в течение необходимого периода времени [4]. Тест эффективен для изучения локальных резервов регуляции микроциркуляции [5]. Информативность холодого теста, впервые примененного нами на коре головного мозга человека, основывается на доказанной связи между развитием патологического очага и нарушением механизмов ауторегуляции мозгового кровотока [6, 7]. В случае онкологических заболеваний эти нарушения в значительной степени определяются гистобиологическими свойствами каждого конкретного вида опухоли. Оценка качественных и количественных изменений характеристик ИК-излучения от перитуморальной зоны важна для диагностики и прогноза. Подробно методика ИК-термокартирования с функциональной холодной пробой описана в работе [8].

При всей перспективности подхода, основанного на объединении ИК-термокартирования и холодого тестирования, существующие методы обработки данных весьма ограничены, что снижает возможности диагностики патологии головного мозга. Как правило, используется визуальный анализ ИК-термокарт и вычисление их простейших дескриптивных характеристик [9]. Чтобы снять данное ограничение, необходимо решить ряд основных задач:

- Выделить надежные информативные признаки, по которым возможно обнаружить патологию и классифицировать ее тип, очертить ее границы.
- Синтезировать адаптивные критерии и решающие правила для обнаружения и классификации типа патологии.
- Разработать алгоритмы оперативного автоматизированного анализа ИК-термокарт с функцией обнаружения и классификации типа патологии и очерчивания ее границ.

Отметим, что разрешение означенных вопросов имеет не только прикладную ценность. Оно способствует изучению фундаментальных проблем связанных с эволюционно предусмотренными программами компенсации дефектов головного мозга, и встроенными в него механизмами ауторегуляции [10].

Настоящая работа освещает подходы и методы решения поставленных задач и построена следующим образом. В разделе 1.1 описаны исходные предпосылки к разработке оригинального подхода к моделированию и анализу ИК-термокарт головного мозга человека. Сам подход изложен в разделах 1.2 – комплексная модель системы «Мозг–Патология–Кровоток» и 1.3 – алгоритмы обработки ИК-термокарт. Пример применения методов приведен в разделе 2. Заключение содержит выводы по работе в целом.

Статья написана по материалам доклада [11] и выступления на семинаре лаборатории автоволновых процессов Института прикладной физики РАН (Нижний Новгород, 24 марта 2011 года).

1. Моделирование и анализ ИК-термокарт головного мозга человека

1.1. Исходные положения. Исходя из постановки задачи, выделение надежных информативных признаков и синтез адаптивных критериев и решающих правил, по которым возможно обнаружить патологию, классифицировать ее тип, а также очертить ее границы, является нетривиальной проблемой. Ибо в ее решении объективно присутствуют следующие трудности:

- сложность анализируемых систем и процессов;
- нелинейность и нестационарность изучаемых систем;
- невозможность полноценной активной идентификации системы «Мозг–Патология–Кровоток»;
- ограниченный объем исходных данных.

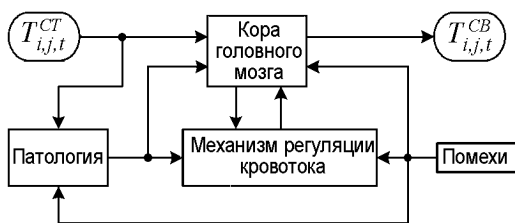


Рис. 1. Блок-схема системы «Мозг–Патология»

Исходя из ауторегулятивных особенностей головного мозга человека [10] для решения поставленных задач была разработана кибернетическая парадигма, условно изображенная на рис. 1. На рисунке обозначены: входное воздействие $T_{i,j,t}^{CT}$ и выходная реакция $T_{i,j,t}^{CB}$ – пространственно-временные распределения температур «холодовой пробы» и открытой коры головного мозга, соответственно. Под «помехами» подразумеваются случайные флуктуации параметров, ошибки измерения и неучтенные факторы.

При синтезе структурно-функциональной схемы системы «Мозг–Патология–Кровоток» (МПК) и моделей на ее основе активно использовались положения синергетики [12], кибернетики [13] и современной теории автоматического управления [14].

1.2. Комплексная математическая модель системы «Мозг–Патология–Кровоток». Учитывая, что прямая и полноценная активная идентификация системы МПК затруднена, при ее изучении на первое место выходят методы комплексного математического моделирования. Структурно-функциональная схема модели, реализующей концепцию «мультифизика», приведена на рис. 2. Модель состоит из двух блоков.

Блок А – моделирование течения жидкости в эластичных и пористых средах (течение крови по сосудам разного калибра) и массотеплопереноса (изменение тем-

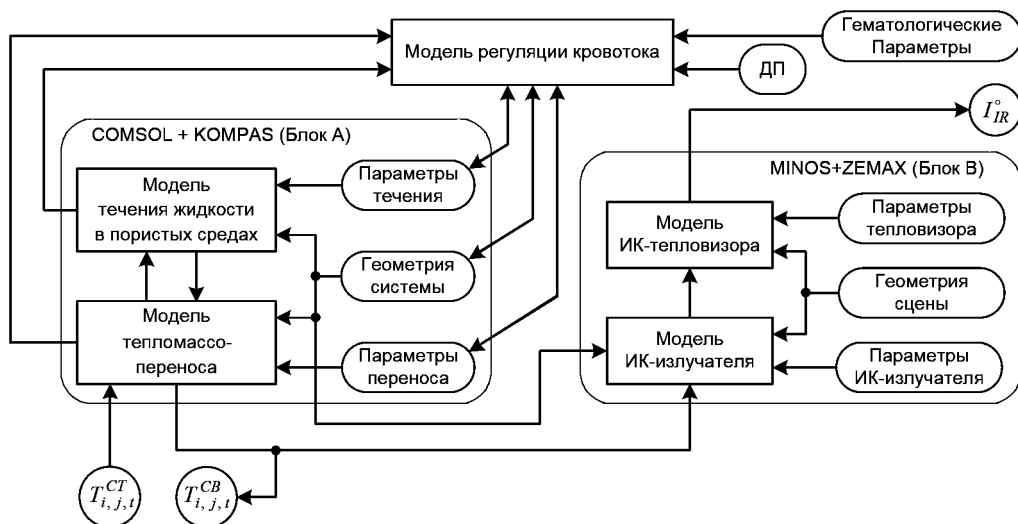


Рис. 2. Комплексная математическая модель процесса ИК-термокартирования головного мозга

пературы тканей в зависимости от параметров мозгового кровотока). Основным программным обеспечением являются COMSOL – решение системы дифференциальных уравнений с частными производными и КОМРАС – задание трехмерной геометрии объектов.

Блок **В** – моделирование процесса получения ИК-термокарт. Блок базируется на технологии MINOS [15, 16] и в качестве основного программного обеспечения включает в себя оптический САПР Zemax – трассировка лучей от источника к приемнику излучения.

Ядром модели является «геометрия системы» – 3-мерная объемная подвижная сетка конечных элементов, описывающая геометрию операционного поля в целом, макро- и микроциркуляторные бассейны, поверхность разных участков коры головного мозга и т. д. В качестве входного воздействия для модели определено пространственно-временное распределение температуры «холодовой пробы» $T_{i,j,t}^{CT}$. На выходе модель выдает временную последовательность скалярных полей I_{IR}^o – кадров ИК-термокарт, каждый из которых содержит пространственное распределение температур в поле зрения тепловизора. Естественно, наблюдению также доступны и все внутренние переменные модели. Так, распределение температур можно получить, минуя «ИК-контур», непосредственно с выхода модели тепломассопереноса – переменная $T_{i,j,t}^{CB}$.

Все основные параметры, задающие свойства системы, доступны для настройки модели при идентификации реальных объектов. Для этого используются: данные гистологии опухоли; результаты КТ и МРТ; параметры мозгового кровотока (УЗ и лазерная доплерометрия), параметры крови (вязкость), и др. Кроме того, активно применяются данные, полученные при биофизических и физиологических научных исследованиях, как пример, показанная на рис. 2 модель регуляции кровотока с набором дополнительных параметров (ДП).

1.3. Автоматизированный анализ ИК-термокарт. Разработка полноценной системы «Surgical cortical image guidance» (интраоперационная нейронавигация по изображению открытой коры головного мозга) требует решения ряда задач, основная из которых – это синтез алгоритмов оперативного автоматизированного анализа ИК-термокарт с функцией обнаружения и классификации типа патологии и очерчивания ее границ. В рамках разрабатываемого авторами подхода к решению этой задачи предлагается схема обработки ИК-термокарт, изображенная на рис. 3.

На вход системы подаются изображения с двух каналов: цветного ТВ – скалярное поле I_{Vs} , цветовая модель HSV; тепловизионного ИК – I_{IR}^o , содержащего отсчеты температур, выраженные в кельвинах. Причем I_{IR}^o – это группа последовательных кадров, упорядоченных и разнесенных во времени: исходное состояние системы – I_{IR}^b ; реакция системы на «холодовую пробу» – I_{IR}^{1-3} .

Оператор (O) вручную классифицирует автоматически выделенные регионы ИК-термокарты на следующие типы: череп; кора; салфетки; инструмент; иное. Далее производится автоматическое построение границ между регионами. Эти операции базируются на адаптивных и самообучающихся алгоритмах из числа Image Processing [17].

Феноменологическая модель динамики осуществляет интерполяцию и экстраполяцию во времени пространственного распределения температур I_{IR}^t . Экстраполяция основана на существовании левой граничной точки I_{IR}^0 – момент окончания

Весь этот массив информации, наряду с дополнительными параметрами (ДП), подается в блок «Выделение Классификация Патологии», выходом которого является векторное поле M_P – оно содержит тип и границы патологии, а также информацию о состоянии коры головного мозга (по участкам).

Принятие решения происходит на основе критериев и правил, которые содержатся в системе, посредством обработки гипотез. Поэтому оператор имеет возможность выставить пороги ошибок первого α и второго β типов, причем независимо для обнаружения и для классификации патологии. В силу нелинейности и нестационарности объекта оценивания, в системе применяются адаптивные и самообучающиеся алгоритмы из числа Data Mining [14,20].

2. Пример применения

В качестве демонстрации некоторых возможностей описанных выше методов моделирования и анализа ИК-термокарт рассмотрим реальную историю заболевания – абсцесс правой теменной доли головного мозга. На рис. 4, *a* показана упрощенная 3D-модель операционного поля, являющаяся частью «геометрии системы» в целом. Геометрия сцены (вид спереди) для ИК термокартирования модели операционного поля приведена на рис. 4, *б* (размеры даны в мм).

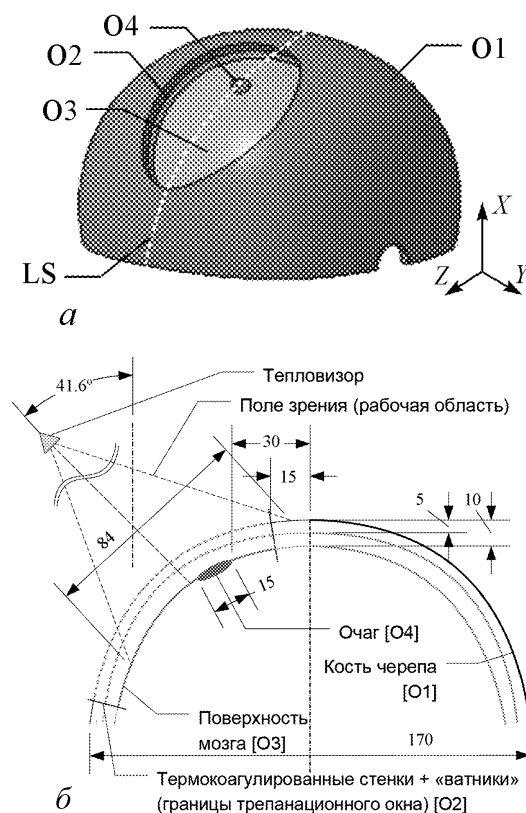


Рис. 4. 3D-модель операционного поля (*a*). Геометрия сцены, вид спереди (*б*)

Обозначения на рисунке имеют следующий смысл: O1 – наружная поверхность черепа; O2 – стенки трепанационного окна; O3 – поверхность головного мозга; O4 – очаг патологии; LS – сечение, по которому строится температурный профиль.

Модель предельно упрощена, тем не менее она позволяет оценить три важных момента, связанных с ИК-термокартированием головного мозга, а именно влияние на итоговое качество термокарты: переотражений и экранировок; ошибок в задании оптических свойств биологических тканей и растворов; кривизны поверхности мозга и ориентации оси визирования тепловизора.

Отметим, что уточнение 3D-модели может идти посредством нанесения на нее дополнительных объектов: ватники; извилины и борозды на коре; кровеносные сосуды различного калибра; увлажнение поверхности; дифференциация свойств объектов.

На рис. 5, *a* показана синтезированная на основе оригинальной техно-

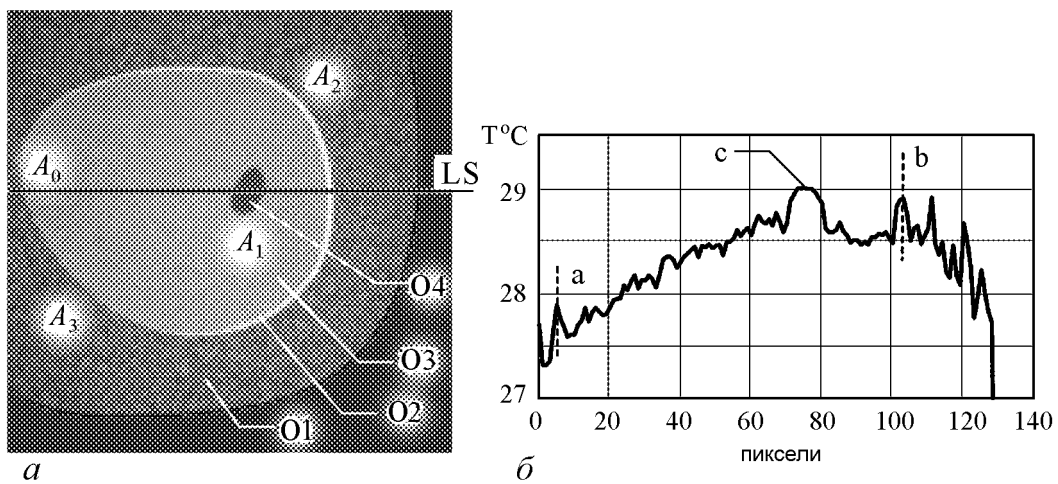


Рис. 5. Синтезированная ИК-термокарта операционного поля (а). Пространственный профиль температуры по сечению LS (б)

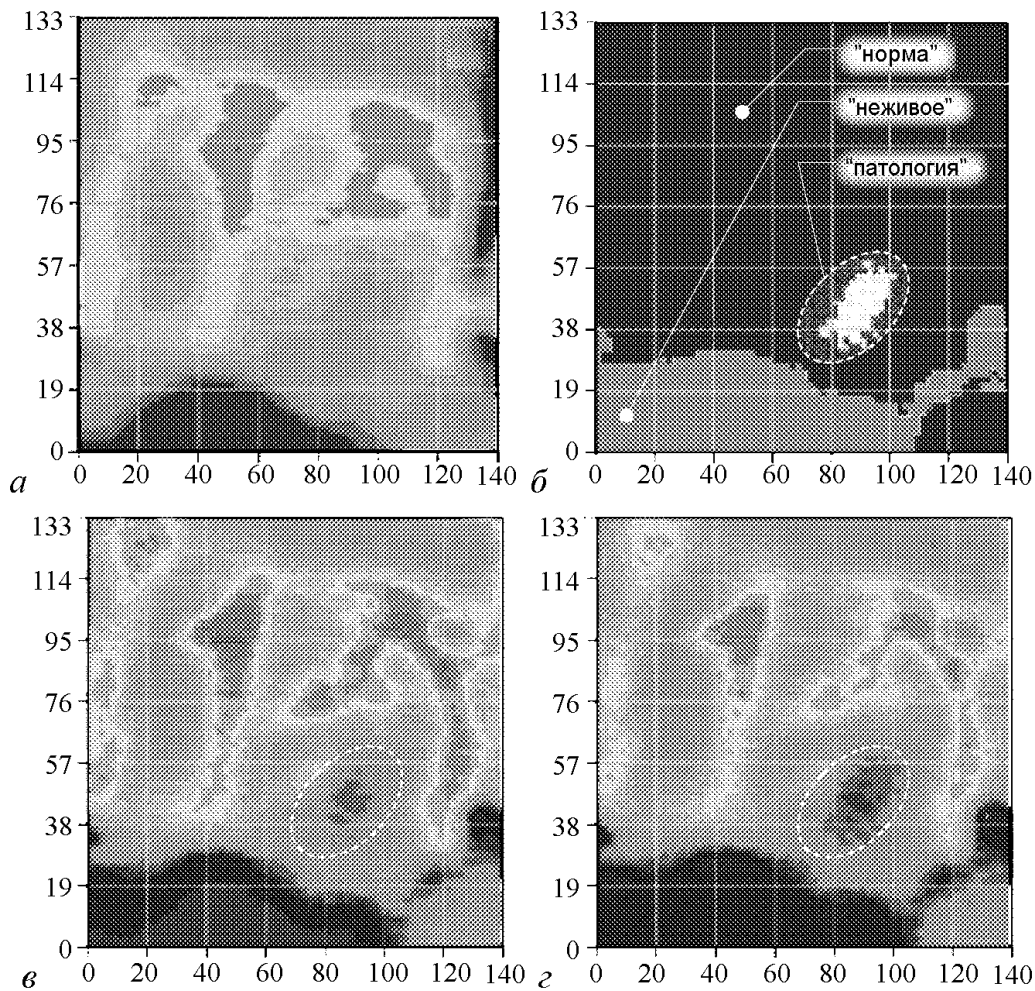


Рис. 6. ИК-термокарты: исходный кадр I_{IR}^b (а); типизированные регионы (б); проблемная область коры (в); поврежденная область коры (г)

логии MINOS [16] ИК-термокарта операционного поля, изображенного на рис. 4. Для наглядности контраст карты увеличен. Символами A_i обозначены зоны размером 12×12 пикселей каждая, в которых производится выборочный тепловизионный контроль температуры. Линия LS – горизонтальное сечение, по нему строится пространственный профиль температуры. Параметры «виртуального тепловизора»: поле зрения $2\omega = 7.8 \times 7.8$ град.; формат матричного приемника излучения 140×140 пикселей; диапазон 3...5 мкм (MWIR); точность определения температуры (зависит от количества трассируемых лучей [15]) $\Delta T = 0.01...1$ °C (на уровне надежности 0.95).

Для проверки влияния кривизны поверхности мозга на ошибку измерения температуры по ИК-термокарте, для всех объектов операционного поля была выставлена температура $T = 29^\circ\text{C}$ и коэффициент светимости $\varepsilon = 0.91$, температура в помещении принята $T_H = 22^\circ\text{C}$. Результат – пространственный профиль температуры по сечению LS – приведен на рис. 5, б, где а и в – отклики от стенок трепанационного окна (O2), с – отклик от очага патологии (O4). Из рис. 5, б видно, что разница температур (восстановленных по ИК-термокарте) областей A_0 и A_1 достигает 1°C . Таким образом, при проведении термокартирования и расчете окончательной температуры должны учитываться кривизна поверхности мозга и ориентация оси визирования тепловизора.

Реальные ИК-термокарты рассматриваемой истории болезни, полученные на тепловизоре Agema-470, были обработаны алгоритмами, описанными в разделе 1.3. Результаты анализа приведены на рис. 6.

Как видно из рис. 6 в, з (см. овальные области, выделенные пунктирной линией) применяемые алгоритмы позволяют не только обнаруживать патологию и очерчивать ее границу, но также и дифференцировать степень повреждения коры головного мозга. Отметим, что координаты очага патологии, выделенного из анализа ИК-термокарт и показанного на рис. 6, б, совпали с таковыми, полученными методами МР-томографии.

Заключение

В настоящей работе представлены подходы и методы моделирования и исследования ИК-термокарт открытой коры головного мозга человека. Разработанная кибернетическая схема опосредованной идентификации системы «Мозг–Патология–Кровоток» направлена на решение главной задачи: выделение надежных информативных признаков, по которым возможно обнаружить патологию, классифицировать ее тип и очертить ее границы.

Принимая во внимание, что прямая активная идентификация изучаемой системы затруднена, авторы на первое место вывели методы комплексного математического моделирования. Изучение системы и построение ее феноменологической модели проводилось с позиций выделенного входного воздействия – «холодовой пробы».

На основе адаптивных критериев и решающих правил для обнаружения и классификации типа патологии синтезирована архитектура алгоритмической составляющей системы интраоперационной нейронавигации по изображению открытой коры головного мозга.

Излагаемые методы и подходы апробированы на реальной истории заболевания – абсцессе правой теменной доли головного мозга. Полученные результаты подтвердили правильность идей и работоспособность моделей и алгоритмов.

Особо стоит отметить следующее. Создаваемый аналитический инструментарий имеет не только прикладную ценность, он также направлен на изучение фундаментальных проблем, связанных с механизмами ауторегуляции в головном мозгу и эволюционно предусмотренными программами компенсации врожденных и приобретенных дефектов этого органа.

Авторы благодарят Пухтеева А. И. за помощь в создании 3D-модели операционного поля.

Библиографический список

1. *Воловик М.Г.* О роли метаболизма и кровотока в формировании термопаттернов, наблюдаемых в ходе оперативных вмешательств у нейрохирургических больных // В сб.: Актуальные проблемы нейрохирургии / Под ред. А.П. Фраермана. Нижний Новгород, 2003. С. 88.
2. *Gorbach A.M., Heiss J.D., Kopylev L., Oldfield E.H.* Intraoperative infrared imaging of brain tumors // J.Neurosurg. 2004. Vol. 101, № 6. P. 960.
3. *Березина В.В.* Исследование адаптационных возможностей кровотока перитуморальной зоны опухолей головного мозга. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. Нижний Новгород, 2009.
4. *Nevill M.E., Garrett A., Maxwell N., Parsons K.C., Norwitz A.J.* Thermal strain of intermittent and continuous exercise at 10 and 35°C in man // Sci. Meet. Physiol. Soc. Birmingham. 1994. № 483. P. 124.
5. *Рыжикова О.П., Шуваева В.Н.* Миогенные реакции различных участков артерио-артериолярного звена пиальной сосудистой сети на их окклюзию у нормо- и спонтанно гипертензивных крыс // Тез. докл. XIX съезда физиол. о-ва им. И.П. Павлова. СПб., 2004. Ч. I. С. 504.
6. *Усатов С.А.* Особенности клиники глиальных опухолей головного мозга различной степени злокачественности в зависимости от выраженности перифокальной зоны // Украинский нейрохир. журн. 1999. № 1. С. 13.
7. *King W.A., Black K.L.* Peritumoral edema with meningiomas // Meningiomas and Their Surgical Management. Philadelphia, 1991. P. 43.
8. *Кравец Л.Я., Воловик М.Г., Колесов С.Н., Березина В.В., Шелудяков А.Ю.* Способ оценки реактивности сосудов коры перитуморальной зоны супратенториальных опухолей / Патент на изобретение № 2269287 от 10.02.2006.
9. *Кравец Л.Я., Воловик М.Г., Шелудяков А.Ю., Колесов С.Н., Григорьева В.В.* Тепловизионный мониторинг операционного поля при нейрохирургических вмешательствах. Сообщение I: Термокартирование коры при супратенториальных опухолях // Тез. докл. V Междунар. симпоз. «Повреждения мозга (Минимально-инвазивные способы диагностики и лечения)». СПб., 1999. С. 208.

10. Фундаментальная и клиническая физиология / Под ред. А. Камкина и А. Каменского. М.: Изд. центр «Академия», 2004. 1073 с.
11. *Воловик М.Г., Макаренко А.В., Правдивцев А.В.* Подходы и методы моделирования и исследования ИК-термокарт головного мозга человека // Вторая Всероссийская конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях». Сборник докладов. Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011.
12. *Хакен Г.* Синергетика/ Пер с англ. М.: Мир, 1980. 406 с.
13. *Эшби У.Р.* Введение в кибернетику. М.: Изд. иностр. лит., 1959. 432 с.
14. Справочник по теории автоматического управления / Под ред. А.А. Красовского. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. 712 с.
15. *Макаренко А.В., Правдивцев А.В., Юдин А.Н.* Метод оценивания внутреннего паразитного излучения оптических трактов инфракрасных систем // Электромагнитные волны и электронные системы. 2009, № 12. С. 28.
16. *Макаренко А.В., Правдивцев А.В.* Ab initio метод оценивания собственного «паразитного» излучения оптических систем инфракрасного диапазона // VIII Всероссийский молодежный Самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике. Сборник конкурсных докладов. Самара: СамГУ, 2010. С. 226.
17. *Zhou H., Wu J., Zhang J.* Digital Image Processing. BookBoon, 2010.
18. *Баренблатт Г.И.* Подобие, автомодельность, промежуточная асимптотика. Приложения к геофизической гидродинамике. 2-е изд. Гидрометеиздат, 1982. 257 с.
19. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
20. *Witten I.H., Frank E., Hall M.A.* Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques (Third Edition), Morgan Kaufmann, 2011. 629 pp.

*Группа «Конструктивная
Кибернетика», Москва
НИИ травматологии
и ортопедии, Н. Новгород*

Поступила в редакцию 14.07.2011

PROBLEMS OF MODELING AND ANALYSIS OF INFRARED THERMO MAPS HUMAN BRAIN

A.V. Makarenko, A.V. Pravdivtsev, M.G. Volovik

This paper presents the approaches and methods for modeling and analysis of the open human cerebral cortex IR-thermo maps. The main goal of the development is to solve fundamental problems: the selection of reliable informative features, which allow detecting abnormalities of the brain, to classify its types, and to delineate its boundaries. The created analytical tools are also directed to the studying fundamental problems related to the mechanisms of autoregulation and compensation in the brain. The described methods and approaches were tested on the real medical history.

Keyword: Map, brain cortex, modeling, identification.



Макаренко Андрей Викторович – родился в г. Орджоникидзе (1977). Канд. техн. наук (2002) по специальности 05.13.01 – «Системный анализ, управление и обработка информации». Руководитель научно-исследовательской группы «Конструктивная кибернетика». Область научных интересов: анализ структуры динамических процессов, предсказуемость; обнаружение, классификация и диагностика не вполне наблюдаемых объектов; синхронизация в нелинейных и хаотических системах. Автор 7 статей в рецензируемых журналах и более 50 докладов. Ассоциированный член IEEE, состоит в секции «IEEE Systems, Man, and Cybernetics Society».

101000 Москва, а/я 560

Web: <http://www.rdcn.ru>

Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика»

E-mail: avm.science@mail.ru



Правдивцев Андрей Виталиевич – родился в Тбилиси (1983). Окончил аспирантуру кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана по специальности 05.11.17 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы». Ведущий специалист научно-исследовательской группы «Конструктивная кибернетика». Область научных интересов: методы синтеза и оптимизации оптико-электронных систем и мультиспектральных оптических трактов. Автор 2 статей в рецензируемых журналах и более 10 докладов. Индивидуальный член Optical Society of America.

101000 Москва, а/я 560

Web: <http://www.rdcn.ru>

Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика»

E-mail: avp@rdcn.ru

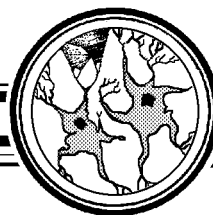


Воловик Михаил Григорьевич – родился в Днепропетровске (1959), окончил Горьковский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1981). Защищал диссертацию на соискание ученой степени канд. биол. наук (1989) на тему «Термоэнцефалоскопические реакции мозга на сенсорные и прямые термические воздействия на кору» в Институте высшей нервной деятельности и нейрофизиологии АН СССР. Старший научный сотрудник Нижегородского НИИ травматологии и ортопедии Минздравсоцразвития России. Участвовал в разработке нового метода исследования мозга – термоэнцефалоскопии, нового направления функциональной диагностики в нейрохирургии – интраоперационного тепловидения. Автор 140 научных работ, монографий (в соавторстве) «Термоэнцефалоскопия – новый метод исследования мозга» (М.: «Наука», 1989), «Медицинское тепловидение: современный методологический подход» (Н. Новгород, 2008), ряда справочников, руководств и пособий; имеет 7 патентов РФ и 2 приоритетных справки по заявкам на изобретения.

603155 Н. Новгород, Верхне-Волжская Набережная, 18

НИИ травматологии и ортопедии Минздравсоцразвития России

E-mail: afanassy@mail.ru



РЕКОНСТРУКЦИЯ ОПЕРАТОРА ЭВОЛЮЦИИ КАК СПОСОБ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА ПРИ ЭПИЛЕПСИИ

Ю.В. Яхно, Я.И. Мольков, Д.Н. Мухин, Е.М. Лоскутов, А.М. Фейгин

Предложен метод анализа электроэнцефалограмм, основанный на построении параметризованной стохастической модели (оператора эволюции) наблюдаемого процесса. Предложена функциональная форма оператора эволюции, описывающая как детерминированные, так и стохастические свойства исследуемого процесса. Параметры оператора эволюции реконструируются по экспериментальным данным с помощью Байесова подхода. Введены новые («быстрые») динамические переменные, учитывающие особенности электроэнцефалограммы и позволяющие построить оператор эволюции для ее участка протяженностью в несколько секунд. Меняющиеся с течением времени параметры этого оператора и амплитуда колебаний в электроэнцефалограмме образуют «медленные» переменные, описывающие изменения свойств колебаний на протяжении всей записи. С помощью введенных медленных переменных удастся выделить различные фазы электрической активности мозга и представить их в виде наглядной диаграммы, а также выявить изменения в характеристиках этих фаз. Предложенная методика успешно применена к решению конкретной физиологической задачи.

Ключевые слова: Электроэнцефалография, анализ временных рядов, реконструкция оператора эволюции.

Введение

Оценка параметров, характеризующих динамику сложных природных систем, является одной из актуальных задач современных исследований как фундаментального, так и прикладного характера. В частности, в современной физиологии большое внимание уделяется проблеме анализа сигналов электрической активности мозга, измеряемых методами электроэнцефалографии [1,2]. Получаемые таким образом сигналы (электроэнцефалограммы, ЭЭГ) широко используются как в клинической практике (например, для диагностики заболеваний), так и в исследовательской работе, поскольку, без сомнения, они отражают фундаментальные процессы, происходящие в мозге. Важной областью анализа ЭЭГ являются исследования эпилепсии (см. [1–3] и ссылки в них). В общем случае причины данной патологии, а также динамические механизмы начала, протекания и окончания эпилептических припадков до сих пор не известны [3]. При исследовании эпилепсии решающее значение приобретают методы выявления *количественных* изменений в экспериментальных данных и способы формализации этих изменений. В данной работе описывается подход

к выявлению изменений в электрической активности мозга при эпилепсии, основанный на реконструкции оператора эволюции динамической системы по сгенерированному ею временному ряду.

В общих чертах схема такой реконструкции выглядит следующим образом. Прежде всего, необходимо выбрать вид оператора эволюции, который должен наиболее полно отражать свойства исходной системы. Согласно развитому в последнее время подходу [4–6], для сложных природных систем, к которым, без сомнения, относится и мозг, наиболее адекватной формой оператора эволюции является модель в виде случайной динамической системы [6]. Далее такие модели мы будем называть стохастическими. Соответствующий им оператор эволюции в явном виде включает случайную компоненту («шум»). Как было показано в [6], удобным для реконструкции в этом случае является следующий вид оператора эволюции:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{D}(\mathbf{x}_n, \mu_{\text{det}}, n) + \mathbf{s}(\mathbf{x}_n, \mu_{\text{stoch}}, n) \cdot \xi_n. \quad (1)$$

Здесь вектор \mathbf{x}_n некоторой размерности d характеризует состояние системы в момент дискретного времени n ; \mathbf{D} есть детерминированная часть оператора эволюции, отвечающая за детерминированное изменение состояния системы со временем и зависящая кроме текущего состояния системы от набора параметров μ_{det} , а также, в общем случае, от дискретного времени; матрица \mathbf{s} размерности d есть стохастическая часть оператора эволюции, определяющая степень воздействия шума на динамику системы и зависящая от текущего состояния системы, набора параметров μ_{stoch} и, в общем случае, от времени; последовательность векторов $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ размерности d представляет собой белый гауссов шум с некоррелированными компонентами. В целом правая часть (1) представляет собой стохастический оператор эволюции системы. Шум в данной модели называется динамическим, так как влияет на состояние системы в последующие моменты времени. Измерительный шум всюду ниже предполагаем незначительным, то есть считаем, что измеряемые характеристики системы связаны с ее истинными состояниями \mathbf{x}_n детерминированным образом.

Запись оператора эволюции в данном виде позволяет учесть «открытость» природной системы. Детерминированная часть оператора эволюции воспроизводит наблюдаемую регулярную динамику, отвечающую диапазону временных масштабов, интересующему исследователя, а нерегулярность, вносимая как мелкомасштабными («быстрыми») внутренними факторами, так и неконтролируемыми (не измеряемыми) внешними воздействиями на систему, описывается стохастической частью оператора. Применение такого подхода для обработки сигналов ЭЭГ обусловлено чрезвычайной сложностью их состава, представляющего собой суммарную активность многих нейронов и нейронных ансамблей в коре мозга, подвергающихся постоянному и неконтролируемому воздействию со стороны подкорковых структур и остального мозга.

Для количественной оценки соответствия стохастической модели (1) наблюдаемым данным нами используется широко известный статистический (Байесов) подход к решению обратных задач [4–6]. С его помощью по имеющемуся экспериментальному временному ряду восстанавливаются распределения плотностей вероятностей свободных параметров модели и наиболее вероятные значения этих параметров (μ_{det} и μ_{stoch} в (1)). После нахождения этих характеристик на различных участках одного временного ряда можно определить, как со временем меняются свойства исходной системы. Как показано далее, с помощью данного подхода можно выявить интересующие исследователей изменения в сигнале, изучить его нелинейно-динамические свойства и сделать предположения об их фундаментальных причинах.

1. Постановка задачи

Исследуемый в данной работе тип эпилепсии – абсансная неконвульсивная эпилепсия, которая проявляется в ЭЭГ в виде спонтанно возникающих широко генерализованных (захватывающих большие участки коры мозга) пространственно-временных структур: так называемых пик-волновых разрядов [3, 7, 8]. Во время разряда происходит кратковременное нарушение сознания, могут возникать непроизвольные подергивания лицевых мышц, однако генерализованные судороги, как при других типах эпилепсии, не наблюдаются. В качестве исходных данных для анализа нами были использованы записи ЭЭГ крыс, генетически предрасположенных к абсансной эпилепсии (см. подробнее раздел 6). Пик-волновые разряды в ЭЭГ у крыс возникают до нескольких десятков раз в час [9], длятся от одной до нескольких секунд и проявляются в виде четко различимых осцилляций электрического потенциала мозга, регистрируемого вживленным электродом (рис. 1). Эти осцилляции выделяются характерной формой, большой амплитудой, относительно стабильной частотой на фоне гораздо менее выраженных осцилляций потенциала мозга в покое.

Воздействие медикаментов на состояние подопытных животных изучается по изменениям, происходящим в их ЭЭГ. При этом нередко основное внимание уделяется частоте возникновения и продолжительности разрядов, а также качественным особенностям изменения их формы [9].

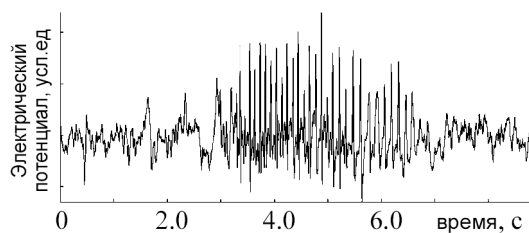


Рис. 1. Фрагмент ЭЭГ крысы, генетически предрасположенной к абсансной эпилепсии (электрический потенциал коры мозга, регистрируемый электродом в исследуемой области коры). Приблизительно с 3 по 7 секунду происходит пик-волновой разряд

Задачей данного исследования являлось построение оператора эволюции, который *количественно* описывал бы динамику регистрируемого электрического потенциала на протяжении *всей* записи (кроме участков измерительного шума, см. подробнее раздел 6). Для демонстрации возможностей этого оператора эволюции мы рассмотрели прикладную задачу выявления и формализации изменений в сигнале ЭЭГ, вызванных введением медикаментов, по изменению наиболее вероятных значений параметров.

2. Амплитудно-фазовые координаты

Для того чтобы реконструировать оператор эволюции системы в виде (1), необходимо (применяя специальные методики [10] или из априорных соображений) выбрать его размерность, а также конкретную функциональную форму его частей D и s . Этот выбор существенно зависит от временного масштаба процессов, которые должен воспроизводить оператор, а также от требуемой степени детализированности этого воспроизведения. Для данной задачи интересующий нас временной масштаб определяется периодом осцилляций электрического потенциала во время пик-волновых разрядов (см. рис. 1).

Для определения необходимой размерности оператора эволюции системы в теории анализа временных рядов [10] существуют стандартные методы (например, «метод фальшивых соседей», определение корреляционной размерности). Однако

эти методы применимы только для относительно слабо зашумленных рядов, что в нашем случае заведомо не выполняется. Поэтому размерность оператора эволюции должна выбираться из априорных соображений.

Стандартная схема реконструкции по скалярному временному ряду включает в себя увеличение размерности исходного ряда с помощью теоремы Такенса [11]. При этом в качестве дополнительных координат используются значения той же переменной, смещенные по времени на некоторую величину (так называемые «запаздывающие переменные»). В результате из одномерного процесса $u(t_n) \in \mathbb{R}^1$ получаются векторы $\mathbf{u}(t_n) = \{u(t_n), u(t_n - \tau_1), \dots, u(t_n - \tau_{d-1})\} \in \mathbb{R}^d$, образующие новый (векторный) ряд. Однако в нашем случае применить этот подход «напрямую» не представляется возможным из-за двух существенных особенностей исходного временного ряда. Одна из них – существенная нелинейность осцилляций, выражающаяся в наличии высоких узких пиков, вторая проявляется в наличии протяженных (по сравнению с длительностями узких пиков) нерегулярных («шумовых») изменений в интервале между осцилляциями. Данные особенности сигнала приводят, прежде всего, к тому, что построенный ряд более высокой размерности содержит шумовую составляющую порядка динамического диапазона изменения переменной. Кроме того, использование запаздывающих переменных приведет в рассматриваемой ситуации к заведомо высокой размерности модели, адекватной реконструируемой системе, что в условиях ограниченного объема данных является нежелательным.

Для преодоления вышеописанных трудностей необходимо перейти к некоторым новым координатам имеющегося процесса, для которых может быть корректно решена задача реконструкции оператора эволюции. При этом необходимо, чтобы оператор эволюции системы мог воспроизводить наблюдаемые в эксперименте осцилляции электрического потенциала как во время разрядов, так и при их отсутствии, имея как можно меньшую размерность. Эту задачу удастся решить, если явно учесть, что рассматриваемый процесс является колебательным, и перейти к описанию сигнала в терминах амплитуды и фазы. Для этого в первую очередь необходимо преобразовать исходный временной ряд в ряд отсчетов амплитуды и ряд отсчетов фазы.

Следует отметить, что существенная мультимасштабность наблюдаемых осцилляций не позволяет применять для извлечения информации об амплитуде и фазе процесса по имеющейся его реализации часто используемое преобразование Гильберта [12]. Более сложные методы введения фазы сигнала (такие как метод эмпирических мод [13]), рассматривающие эту проблему в общем виде, являются, с точки зрения поставленной задачи (единообразное воспроизведение как высоких узких пиков во время пик-волновых разрядов, так и колебаний с другими временными масштабами, формирующих ЭЭГ), слишком громоздкими, сложными в адаптации и требующими существенных вычислительных ресурсов.

Для того чтобы выделить из исходного ряда амплитуду и фазу, удовлетворяющие вышеперечисленным требованиям в рассматриваемом случае ЭЭГ при эпилепсии, нами предложен следующий относительно простой алгоритм. На первом этапе выделяются верхняя и нижняя огибающая анализируемого сигнала. Для этого сначала в ряду отыскиваются все значения, максимальные в некоторой своей окрестности по времени (размер окрестности порядка половины периода колебаний потенциала во время пик-волнового разряда). Данный алгоритм выделяет большинство вершин

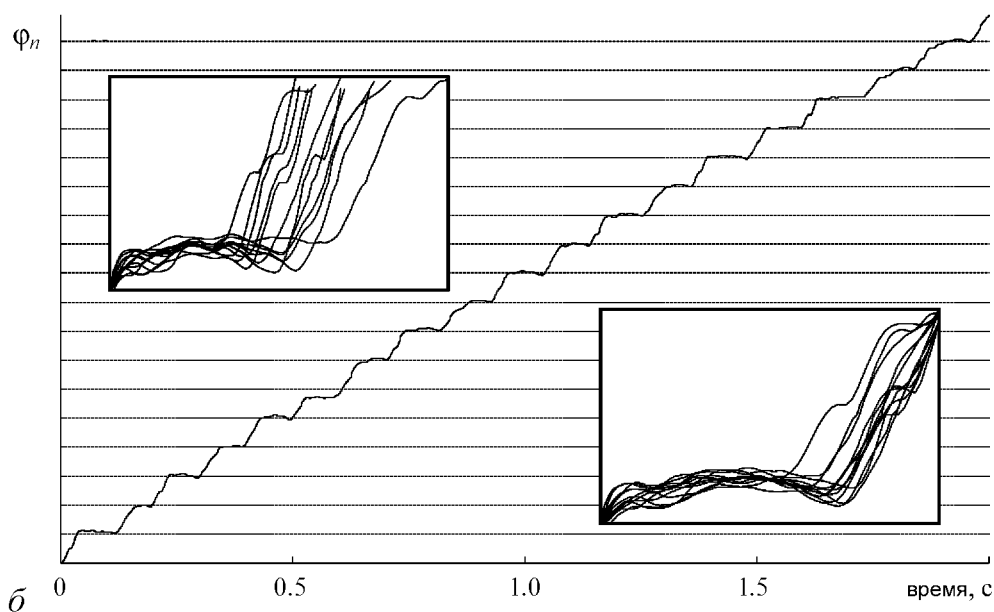
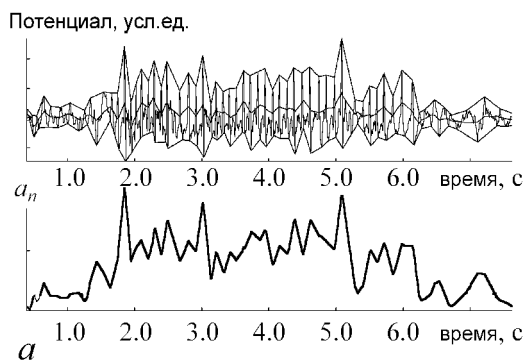
узких пиков, из которых состоит разряд, и достаточно уединенные максимумы колебаний потенциала в отсутствие разрядов. Стоит отметить, что некоторое число пиков в пик-волновых разрядах может выделяться неправильно, однако оценки показывают, что доля неправильно выделенных пиков менее 5%, а их наличие не влияет на результат статистически значимо. Далее находятся минимумы осцилляций, как точки с минимальным абсолютным значением между двумя соседними максимумами. Полученные точки максимумов и минимумов колебаний являются опорными точками для верхней и нижней огибающих сигнала, соответственно. Для того чтобы определить значения огибающих в каждой точке ряда, мы предполагаем зависимости огибающих от времени медленными, и аппроксимируем эту зависимость кусочно-линейной функцией: соседние точки максимумов или минимумов соединяются отрезком прямой. Существует небольшой процент точек в сигнале, которые оказываются вне интервала между верхней и нижней огибающими. В этом случае значения соответствующей огибающей в данных точках корректируются таким образом, чтобы они совпадали с сигналом.

Получив кусочно-линейные ряды $\mathbf{u}^{\max} = \{u_n^{\max}\}_{n=1}^N$ для верхней и $\mathbf{u}^{\min} = \{u_n^{\min}\}_{n=1}^N$ для нижней огибающей, обработанный с их помощью исходный сигнал $\mathbf{u} = \{u_n\}_{n=1}^N$ можно разложить на три независимых составляющих: среднее значение, амплитуду и фазу. Члены рядов для среднего значения и амплитуды сигнала вычисляются, соответственно, по формулам $c_n = (u_n^{\max} + u_n^{\min})/2$ и $a_n = (u_n^{\max} - u_n^{\min})/2$. Для того чтобы найти значения ряда для фазы колебаний, используем априорное предположение о том, что данный процесс является «мгновенно-гармоническим», а все нелинейные и мультимасштабные эффекты определяются его фазой: $u_n = a_n \cos(\varphi_n) + c_n$. Отсюда значения фазы определяются формулой $\varphi_n = \text{Arccos}((u_n - c_n)/a_n)$, где нужная ветвь функции Arccos выбирается в зависимости от того, на каком участке колебаний (возрастающем или убывающем) находится текущая точка u_n (это легко определить с помощью выделенных ранее максимумов и минимумов сигнала).

Ступенчатый характер зависимости фазы от времени во время пик-волнового разряда является прямым отражением нелинейности (или мультимасштабности) наблюдаемых колебаний. По построению, амплитуда во время разряда меняется медленно, она не описывает форму отдельных колебаний, а только изменение их свойств от периода к периоду. Фактически, вся информация о форме отдельных осцилляций по построению переносится в зависимость фазы от времени. В случае идеальной синусоиды выделенная таким образом фаза имела бы линейную зависимость от времени. В случае колебаний, наблюдаемых в реальном пик-волновом разряде (узкие уединенные пики) фаза меняется быстро там, где меняется быстро мгновенный потенциал (возрастающий и спадающий участки пика образуют почти вертикальный скачок фазы вверх). Там, где потенциал меняется медленно (между пиками) фаза тоже меняется медленно (на зависимости фазы образуется плато, привязанное к $\text{const} + 2\pi n$ по построению). Данная динамика фазы является прямым отражением фундаментального факта генерации системой во время пик-волнового разряда двух несоизмеримых временных масштабов. Таким образом, из трех получившихся в результате обработки рядов наибольшая информация о нелинейных свойствах осцилляций в сигнале содержится в ряде для фазы. На основании этого ряда можно построить низкоразмерную модель оператора эволюции системы, используя разработанный ранее для общих случаев подход [6].

Как видно из верхней врезки на рис. 2, б, наиболее заметной особенностью динамики фазы является нерегулярная продолжительность ее периодических изменений. Причем в некотором «собственном времени» каждого периода (нижняя врезка на рис. 2, б) профили роста фазы совпадают очень хорошо. Это говорит о том, что колебания во время пик-волновых разрядов достаточно хорошо детерминированы, но, как отмечалось ранее, есть существенная девиация в их периоде. Анализ ряда фазы (в отличие от анализа мгновенных значений напряжения) позволяет учесть эту девиацию корректно. Действительно, каждый узкий пик в пик-волновом разряде существенно меняет абсолютное значение фазы (рис. 2, б), а значение напряжения остается на прежнем уровне (см. рис. 1, рис. 2, а). Таким образом, модель эволюции фазы воспроизводит не только форму, но и число колебаний в пик-волновом разряде. В свою очередь, при описании колебаний через мгновенное напряжение существует множество примерно равноценных вариантов, в которых один или несколько пиков не воспроизводятся (иными словами, задача становится некорректной).

Рис. 2. а – Иллюстрация выделения амплитуды и фазы в ряду. На верхней части графика обозначены выделенные верхняя и нижняя огибающие, а также средняя составляющая сигнала. На нижней части графика представлен получившийся ряд для амплитуды сигнала. б – Общий вид полученного ряда для фазы колебаний во время пик-волнового разряда (расстояние между соседними отметками по оси ординат равно 2π). Как видно из графика, полученная зависимость имеет «ступенчатый» характер. Верхняя врезка: несколько наложенных друг на друга последовательных периодов изменения фазы, смещенных в начале периода. Нижняя врезка: те же периоды, растянутые таким образом, чтобы иметь одинаковую продолжительность



3. Мелкомасштабная фазовая модель

Поскольку синтезируемая нами модель должна воспроизводить наименьший из интересующих нас масштабов – отдельные колебания потенциала, будем называть ее мелкомасштабной.

Извлеченная из ЭЭГ описанным выше способом (см. рис. 2) зависимость фазы от времени с достаточной точностью может быть описана одномерным точечным отображением

$$\tilde{\varphi}_{n+m} = \varphi_n + m \cdot dt (\lambda - \cos(\varphi_n - \varphi^0)) + \sigma \xi_n = D(\varphi_n, \mu_{\text{det}}) + s \xi_n, \quad (2)$$

где $\tilde{\varphi}_{n+m}$ – генерируемое оператором эволюции системы значение фазы через m временных отсчетов от текущего отсчета n ; φ_n – текущее значение фазы в исходном ряде; $dt > 0$, $\lambda > 1$ и φ^0 – свободные параметры детерминированной части оператора эволюции; σ – свободный параметр стохастической части оператора эволюции; $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n$ – белый гауссов шум. В соответствии с используемым нами подходом, не воспроизводимые детерминированной частью модели (2) особенности поведения исходной системы описываются статистически (стохастическую часть для этого оказывается достаточным задать в простейшем виде). Таким образом, в обозначениях (1): $\mu_{\text{det}} = \{dt, \lambda, \varphi^0\}$, $\mu_{\text{stoch}} = \{\sigma\}$. Необходимо отметить, что параметр m в (2) может оказывать существенное влияние на оптимальные (отвечающие максимуму плотности вероятности) значения прочих параметров и качество воспроизведения моделью исходного ряда. Выбор его оптимального значения может быть рассмотрен в виде отдельной задачи. В данной работе этот параметр был фиксирован и равнялся 15, что составляет примерно четверть среднего периода колебаний потенциала в пик-волновом разряде.

Для завершения реконструкции оператора эволюции по экспериментальным данным необходимо, как уже отмечалось, построить многомерное распределение вероятности в пространстве параметров этого оператора (то есть записать теорему Байеса для рассматриваемой модели вида (1)). Общий случай такого распределения, рассмотренный в [6], может быть упрощен и для данной задачи представлен в следующем виде:

$$P_{\text{posterior}}(\mu_{\text{det}}, \mu_{\text{stoch}} | \{\varphi_n\}_{n=1}^N) \propto P_{\text{prior}}(\mu_{\text{det}}, \mu_{\text{stoch}}) \frac{1}{\sigma^{N-m}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \sum_{n=1}^{N-m} \frac{(\varphi_{n+m} - D(\varphi_n, \mu_{\text{det}}))^2}{\sigma^2} \right\}. \quad (3)$$

Здесь $P_{\text{posterior}}(\mu_{\text{det}}, \mu_{\text{stoch}} | \{\varphi_n\}_{n=1}^N)$ – апостериорная вероятность того, что экспериментальный ряд $\{\varphi_n\}_{n=1}^N$ был сгенерирован системой (2) при текущих параметрах μ_{det} и μ_{stoch} ; $P_{\text{prior}}(\mu_{\text{det}}, \mu_{\text{stoch}})$ определяет априорные ограничения на параметры оператора; остальные обозначения те же, что и в (1), (2). В нашем случае априорная информация о параметрах оператора заранее не известна, поэтому $P_{\text{prior}}(\mu_{\text{det}}, \mu_{\text{stoch}})$ следует считать постоянной на всем физически обоснованном диапазоне изменения параметров, и соответствующий множитель в (3) можно опустить. Благодаря достаточно простому виду модели (2), задачу поиска максимума функции (3) (наиболее вероятных значений параметров dt, λ, φ^0 и σ) в данном случае удастся решить аналитически.

Стоит отдельно отметить, что предлагаемая модель изменения фазы (2) не является универсальной, то есть существует неустранимое с помощью подбора значений параметров отличие сгенерированного ряда значений от наблюдаемого. В связи с этим возникает вопрос об адекватности данной модели исследуемой системе. Ответ на этот вопрос зависит от определения степени адекватности модели, которое, в свою очередь, зависит от цели моделирования. Достаточно очевидно, например, что при построении прогностических моделей сложных природных систем (с малым количеством априорной информации об их динамике) максимально точное воспроизведение моделью наблюдаемого временного ряда не может служить мерой ее адекватности. Искомой количественной мерой адекватности модели в данном случае может служить величина апостериорной плотности вероятности (3) (ее вид в общем случае приведен в [6]) при оптимальных значениях параметров модели. В общем случае регулярных методов нахождения функциональной формы модели, полностью адекватной исследуемой системе, не существует. Поэтому под «адекватностью модели исследуемой системе» мы будем понимать способность модели воспроизводить интересующие исследователя свойства сигнала (в рассматриваемой нами задаче к ним относятся число колебаний и многомасштабность пиков в пик-волновых разрядах, см. подробнее раздел 2). В этом смысле предлагаемая модель (2) адекватна ряду фазы, извлеченному из ЭЭГ при эпилепсии.

«Неуниверсальность» модели приводит к тому, что в действительности значения шума ξ_n в (2) становятся коррелированными. Следовательно, полученная в этом предположении формула апостериорной плотности вероятности (3) становится верной лишь приближенно. Однако оптимальные значения параметров модели, полученные при помощи формулы (3), при этом практически не меняются, так как отражают те свойства сигнала, которые модель (2) описывает хорошо (см. раздел 4.).

Как уже упоминалось во Введении, для выявления заранее не известных изменений в динамике сигнала ЭЭГ, вызванных медикаментами, нужно обрабатывать отдельные участки записи и получать для каждого из них свое распределение параметров модели (2). Таким образом, распределение параметров (3) становится характеристикой осцилляций на выбранном участке записи. В первом приближении это распределение можно характеризовать координатами его максимума: наиболее вероятными значениями параметров dt^* , λ^* , φ^{0*} и σ^* . В результате каждому обрабатываемому участку ЭЭГ ставится в соответствие набор из 4 параметров, характеризующих динамику ЭЭГ на этом участке. Будем называть эту процедуру «обучением» модели на текущем участке записи.

4. Медленные переменные: «синхронность» и усредненная амплитуда

Как уже было сказано, для того чтобы более детально проследить за изменениями характеристик ЭЭГ под действием лекарств, необходимо обрабатывать ее всю, не выделяя отдельно пик-волновые разряды. В то же время, модель (2) предполагает, что на участке записи, на котором восстанавливается распределение ее параметров, характеристики исследуемого сигнала стационарны. Для того чтобы описать «медленную» динамику всей записи ЭЭГ с помощью мелкомасштабной фазовой модели (2), мы обрабатывали ЭЭГ скользящим окном, считая процесс в пределах окна стационарным. Известно, что среднее время стационарности сигнала ЭЭГ –

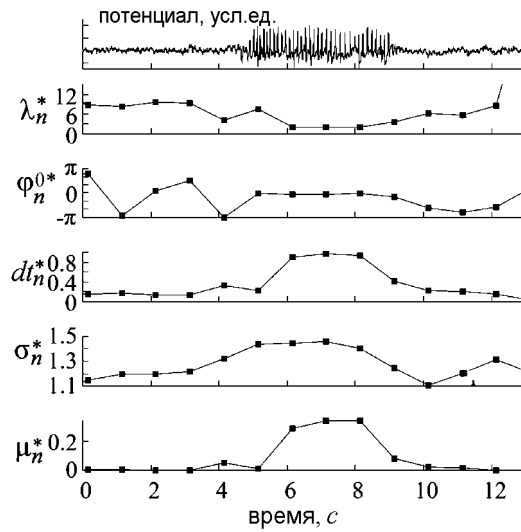


Рис. 3. Изменения параметров фазовой модели при возникновении пик-волновых разрядов в ЭЭГ. На верхнем графике представлен сигнал, по которому обучалась модель. Обучение происходило на отрезках сигнала, равных двум секундам с шагом 1 секунда (скользящее окно). На нижних графиках приведены полученные параметры модели, соответствующие каждому из отрезков

пик-волновых разрядов (рис. 3). Как видно из рисунка, значение введенного безразмерного параметра μ_n^* сильнее реагирует на появление разряда в ЭЭГ, чем параметры фазовой модели. Уменьшение λ_n^* во время пик-волнового разряда отражает характерную мультимасштабную форму колебаний внутри разряда (узкие пики); параметр φ_n^{0*} в этом интервале времени стабилизируется около некоторого постоянного значения, что свидетельствует о регулярности этих колебаний; увеличение dt_n^* означает уменьшение характерного периода колебаний; параметр σ_n^* возрастает во время пик-волнового разряда, однако может испытывать заметные вариации и вне его (динамика этого параметра существенно зависит от m в (2) и в данной работе подробно не рассматривается). Так как во время пик-волнового разряда большинство клеток, как известно [3], работают синхронно и отдельные колебания их электрического потенциала складываются в фазе, будем в дальнейшем называть комбинацию параметров (4) мерой «синхронности» активности отдельных нейронов или «синхронностью».

Последующий анализ ряда μ_n^* показал, что одного этого ряда также недостаточно для характеристики происходящих в ЭЭГ процессов с достаточной степенью точности. Необходимо добавить еще, по крайней мере, одну переменную для идентификации происходящих в ЭЭГ процессов. Оказывается, что в качестве второй макромасштабной (или «медленной») переменной может быть использована усредненная по такому же скользящему окну, как и при использовании фазовой модели, амплитуда сигнала

$$x_n = \frac{1}{M} \sum_{i=k}^{k+M-1} a_i, \quad (5)$$

где M – ширина скользящего окна, а k – его текущая позиция в ряде. Сама по се-

порядка нескольких секунд [14]. В нашей обработке размер скользящего окна равнялся 2 секундам, а его шаг – 1 секунде. Для каждого такого окна находились наиболее вероятные значения параметров dt_n^* , λ_n^* , φ_n^{0*} и σ_n^* , локально характеризующие колебания, происходящие на соответствующем небольшом участке ЭЭГ.

В результате такой обработки получается новый ряд значений параметров dt_n^* , λ_n^* , φ_n^{0*} и σ_n^* , меняющихся непрерывно на протяжении всей записи. Мы исследовали следующую безразмерную комбинацию трех параметров из этого набора:

$$\mu_n^* = \frac{dt_n^*}{\lambda_n^* \sigma_n^*}. \quad (4)$$

Выбор вида этой комбинации обусловлен изменением входящих в нее параметров при возникновении пик-

бе эта переменная также не может охарактеризовать ЭЭГ с достаточной точностью: амплитуды совершенно различных по своей природе колебаний могут совпадать и, более того, амплитуды колебаний в тех или иных режимах сильно варьируются от особи к особи, а также чувствительны к конкретным особенностям установки датчиков. Однако, как демонстрируется ниже, в фазовом пространстве переменных (x, μ^*) действие медикаментов на динамику ЭЭГ можно обнаружить статистически достоверно.

5. Фазовая плоскость ЭЭГ в медленных переменных. Способ анализа воздействия медикаментов

Разные режимы колебаний, демонстрируемые исследуемой системой и различаемые физиологами, в новых переменных (x_n, μ_n^*) проявляются в виде различных областей локализации изображающих точек в фазовом пространстве (x, μ^*) . На рис. 4 приведен пример облака фазовых состояний системы (x_n, μ_n^*) , полученного с помощью обработки скользящим окном *всей* записи ЭЭГ для одной из крыс.

Представленное на рисунке облако можно условно разделить на три области: область малых x и μ^* соответствует низкоамплитудной (десинхронизованной) ЭЭГ во время бодрствования (большая часть записи); область со средними значениями x и значениями μ^* от малого до среднего соответствует различным промежуточным процессам (прежде всего, синхронизации ЭЭГ во время сна [15]); область больших значений x и μ^* , главным образом, соответствует патологическим, гиперсинхронизованным, колебаниям в ЭЭГ – пик-волновым разрядам (см. рис. 1).

Различия в динамике ЭЭГ до и после введения медикаментов становятся очевидными, если наложить друг на друга два облака фазовых состояний для одной и той же крысы, характеризующие периоды до и после введения медикаментов. На рис. 5 изображены два таких облака для той же крысы, что и на рис. 4.

Как видно из рисунка, область распределения, соответствующая пик-волновым разрядам, изменила свое положение в фазовом пространстве. Поскольку природа введенных переменных x и μ^* различна (и изменения, которые могут происходить в этих характеристиках, могут быть не связаны между собой), рассмотрим, как меняется положение области пик-волновых разрядов по каждой из координат *отдельно*. Для этого введем в рассмотрение множество X_b , содержащее координаты x всех точек диаграммы, соответствующих участку ЭЭГ до введения медикаментов, и множество X_a , содержащее координату x всех точек после введения медикаментов. Аналогично введем множества Z_b и Z_a , отвечающие координатам μ^* точек до и после введения медикаментов, соответственно. Включим в эти множества только те точки, которые на диаграмме находятся в области, отвечающей разрядам. Таким образом минимизируется влияние на результат различных посторонних факторов (например, количество времени, проведенного крысой в состоянии сна), которые меняют распределение точек в других частях диаграммы. Соответствующая эпилептическим разрядам часть выделялась из получившихся облаков вручную (см. рис. 5).

Таким образом, задача сводится к сравнению множеств X_b и X_a и множеств Z_b и Z_a попарно. Для проверки статистической значимости, а также направленности изменений в характеристиках данных множеств мы ввели следующие простые величины, показывающие относительное смещение среднего значения проекций точек на оси x и μ^* до и после введения медикаментов:

$$\chi_x = \frac{m_b^x - m_a^x}{\sigma_b^x + \sigma_a^x}; \quad \chi_z = \frac{m_b^z - m_a^z}{\sigma_b^z + \sigma_a^z}. \quad (6)$$

Здесь $m_{b,a}^x$ и $m_{b,a}^z$ – средние значения множеств $X_{b,a}$ и $Z_{b,a}$, соответственно; параметры $\sigma_{b,a}^x$ и $\sigma_{b,a}^z$ равны, соответственно, среднеквадратическому отклонению множеств $X_{b,a}$ и $Z_{b,a}$. Таким образом, если величина χ_{μ} по модулю больше некоторого заранее выбранного числа k , то среднее значение параметра μ (средняя амплитуда или «синхронность») при введении медикаментов «сдвигается» по оси μ достаточно для того, чтобы считать этот сдвиг статистически достоверным. Число k , фактически, характеризует площадь взаимного перекрытия двух распределений, задавая, таким образом, допустимый уровень ошибки в утверждении о различии двух измеряемых величин. Конкретное ее значение выбирается исследователем. В нашем случае приемлемый уровень ошибки порядка 3% обеспечивает $k \simeq 2$. Знак величины χ_{μ} отвечает за направление этого сдвига.

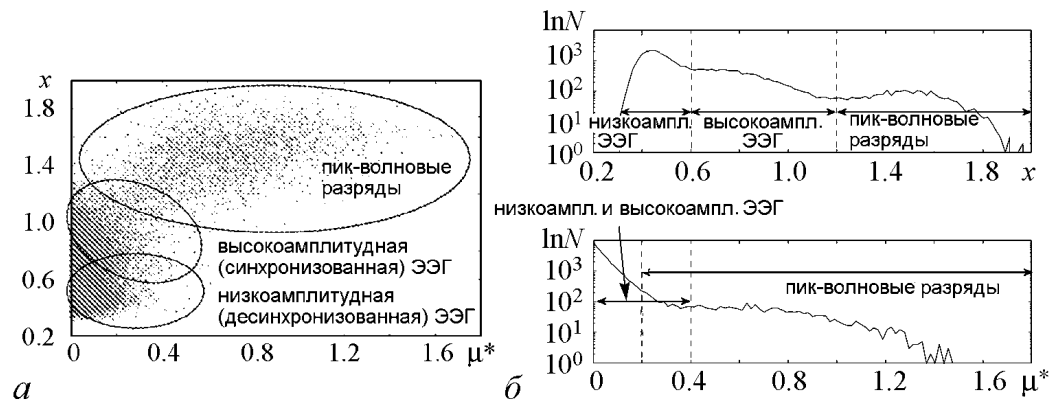


Рис. 4. Облако фазовых состояний, полученное для одной из крыс. *a* – Вид на фазовой плоскости. Отмечены примерные области низкоамплитудной ЭЭГ во время бодрствования, высокоамплитудной ЭЭГ (главным образом, во время сна) и пик-волновых разрядов. *б* – Распределения числа точек по осям (логарифм числа точек, попавших в элементарный интервал по соответствующей переменной)

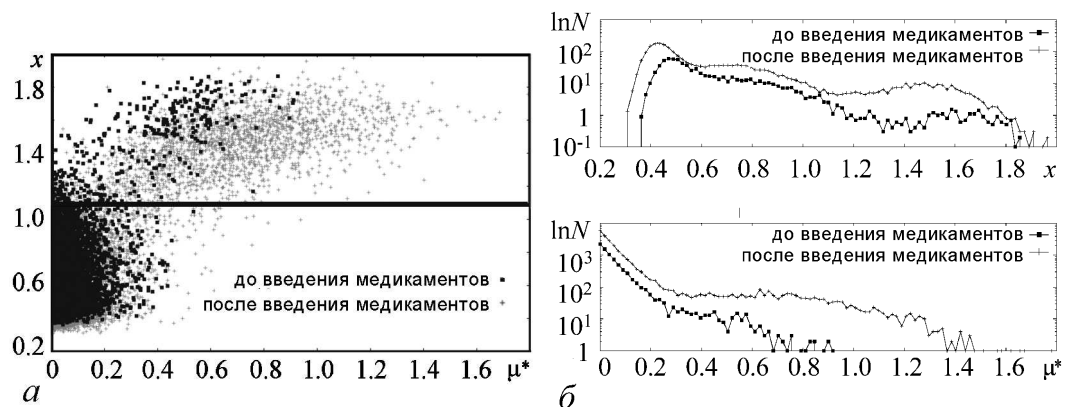


Рис. 5. Сравнение двух облаков фазовых состояний ЭЭГ: до и после введения медикаментов. *a* – Фазовая плоскость. Черным прямоугольником обозначена выделенная вручную область для дальнейшего формализованного исследования только изменений в разрядах. *б* – Распределения числа точек по осям

6. Обрабатываемые данные и результаты исследования

В качестве данных для демонстрации возможностей предлагаемого оператора эволюции (2) и вспомогательного метода анализа ЭЭГ, описанного в разделе 5, мы использовали результаты экспериментов, проведенных доктором С. М. van Rijn [16]. Во время экспериментов у свободно перемещающихся крыс записывалась электрическая активность в различных областях головного мозга.

Нами были исследованы записи активности в лобной и теменной областях, так как там эпилептические разряды выражены наиболее сильно. Эксперимент включал в себя сначала фоновую запись ЭЭГ у крыс в течение 2 часов без какого-либо вмешательства, затем крысам вводился тот или иной медикамент, и запись продолжалась еще порядка 6 часов. Частота дискретизации сигнала составляла 512 отсчетов в секунду. Кроме участков, непосредственно отражающих активность исследуемого объекта (участка коры мозга), в записи в значительном количестве присутствовали интервалы «нефизиологического» изменения регистрируемого потенциала, обусловленного особенностями постановки эксперимента и используемого оборудования. Подобные участки были предварительно размечены вручную, а результаты их обработки скользящим окном исключены из анализа.

Нами были исследованы эксперименты с тремя типами медикаментов: «(R)-(+)-WIN 55,212-2» (агонист каннабиноидных рецепторов CB_1), «AM 251» (антагонист/обратный агонист каннабиноидных рецепторов CB_1), а также с контрольным введением растворителя, использовавшегося для введения данных медикаментов (далее, соответственно, агонист, антагонист и раствор). Полная информация о проведенном эксперименте содержится в [16]. Для каждого из этих препаратов исследовались две дозы: большая (12 мг/кг для агониста и антагониста и 4 мл/кг для раствора) и малая или пороговая (3 мг/кг для агониста и антагониста и 2 мл/кг для раствора). Результаты обработки этих данных вышеизложенным методом представлены в таблице и на рис. 6.

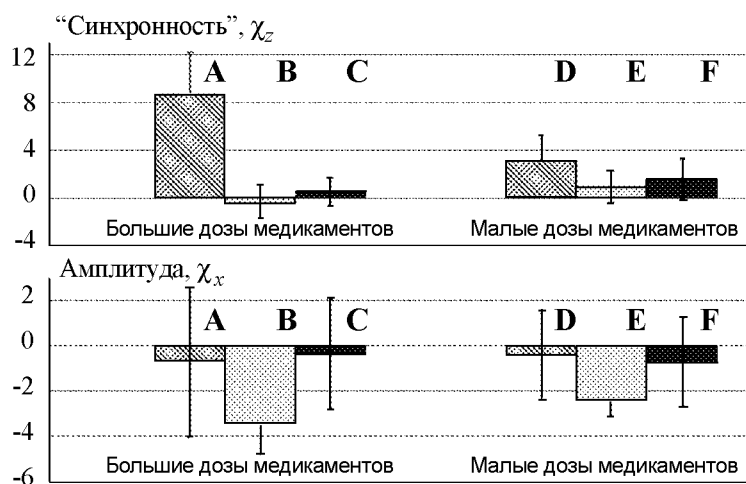


Рис. 6. Результаты обработки ЭЭГ крыс: изменения средних «синхронности» и амплитуды (6) в пиковых разрядах после введения медикаментов. На графиках приведены усредненные данные по 6 группам записей в зависимости от величины дозы и типа медикамента (см. подробнее таблицу)

Для проверки статистической значимости выявленных изменений в группах записей мы использовали t-критерий Стьюдента [17]: проверялась гипотеза о равенстве нулю среднего значения χ_z или χ_x в той или иной группе (p – вероятность того, что эта гипотеза верна). Необходимо отметить, что все результаты t-критерия Стьюдента получены в предположении, что распределение исследуемых величин в каждой выборке гауссово. Как видно из верхнего левого графика на рис. 6, при введении большой (12 мг/кг) дозы агониста у исследованной группы крыс наблюдается статистически достоверное изменение средней «синхронности» пик-волновых разрядов ($p = 0.00012$), в то время как при введении больших доз антагониста или раствора таких изменений не происходит ($p = 0.37$ и $p = 0.19$, соответственно). Анализ результатов обработки отдельных записей показывает, что, исследуя ЭЭГ для лобной и теменной долей мозга, возможно для каждой исследованной крысы установить факт введения агониста. Изменения амплитуды разрядов при введении больших доз медикаментов, как видно из нижнего левого графика на рис. 6, не позволяют однозначно установить каких-либо изменений в ответ на введение агониста ($p = 0.59$) или раствора ($p = 0.66$), но введение антагониста приводит к уменьшению средней амплитуды разрядов ($p = 0.00014$). Однако анализ отдельных записей внутри группы показывает, что по результатам изменения средней амплитуды разрядов у одной крысы невозможно сделать вывод о типе введенного медикамента. При малых (пороговых) дозах медикаментов, как видно из верхнего правого графика на рис. 6, «синхронность» пик-волновых разрядов меняется гораздо менее специфично к исследуемым медикаментам ($p = 0.0021$ для агониста, $p = 0.11$ для антагониста и $p = 0.019$ для раствора). Однако, поскольку вероятности отсутствия изменений в среднем все еще довольно малы, можно выдвинуть гипотезу о детектировании самого факта введения медикаментов, то есть при введении любого из исследуемых медикаментов средняя «синхронность» разрядов склонна к увеличению. Как видно из нижнего правого графика на рис. 6, изменения в амплитуде разрядов недостаточны для того, чтобы по ним можно было идентифицировать тип медикамента, но снова видно, что при введении антагониста амплитуда разрядов в группе уменьшается ($p = 0.000032$) в отличие от результата введения других медикаментов ($p = 0.56$ для агониста и $p = 0.30$ для раствора).

Таким образом, в данном случае оказалось, что и средняя «синхронность» и средняя амплитуда пик-волновых разрядов изменяются при воздействии медикамен-

Таблица

Проанализированные группы записей ЭЭГ

Обозначение группы (медикамент, доза)	Количество проанализированных записей в группе
A (агонист, 12 мг/кг)	9 записей от 5 особей (5 в лобной области, 4 в теменной)
B (антагонист, 12 мг/кг)	11 записей от 6 особей (6 в лобной области, 5 в теменной)
C (раствор, 4 мл/кг)	11 записей от 6 особей (6 в лобной области, 5 в теменной)
D (агонист, 3 мг/кг)	10 записей от 5 особей (5 в лобной области, 5 в теменной)
E (антагонист, 3 мг/кг)	8 записей от 5 особей (4 в лобной области, 4 в теменной)
F (раствор, 2 мл/кг)	10 записей от 5 особей (5 в лобной области, 5 в теменной)

тов. Качественно, выявленные изменения средней «синхронности» разрядов после введения большой дозы агониста или малой дозы любого из исследованных медикаментов можно описать как в среднем более узкие пики во время осцилляций регистрируемого потенциала. Предположительно, это соответствует тому факту, что разброс фаз между колебаниями потенциала отдельных клеток становится меньше, а порожденные ими осцилляции во время разряда становятся более похожими друг на друга.

Заключение

В данной работе предложен подход к анализу и обработке временных рядов, характеризующих активность мозга, основанный на разработанной ранее парадигме [5, 6], предполагающей реконструкцию оператора эволюции системы по сгенерированному ею временному ряду. Разработан способ анализа ЭЭГ с помощью диаграмм на плоскости медленных переменных (x , μ^*) («амплитуда» (5) и «синхронность» (4)) и показано, что внутренние свойства пик-волновых разрядов отражают воздействие исследованных медикаментов и могут являться существенным диагностическим признаком. Поскольку медленные переменные описывают сигнал непрерывно, предложенный метод потенциально может выявить изменения и в других режимах ЭЭГ.

Заметим, что для максимального упрощения введенного фазового пространства состояний ЭЭГ, в данной работе мы не анализируем динамику отдельных параметров фазовой модели, прочие варианты их комбинаций, влияние на результаты параметра m в (2), а также извлеченный из ЭЭГ ряд значений средней составляющей, полученный на этапе выделения фазы (см. раздел 1). Более того, оператор эволюции был построен только для полученного ряда фазы, а данные об амплитуде учитывались в тривиальной форме. Стохастическая часть оператора (2) для сокращения количества параметров и упрощения интерпретации результатов была на данном этапе записана нами в тривиальной форме. Зависимость стохастической части от фазы колебаний позволяет, в принципе, учесть дополнительные связи между данными в исследуемой системе и сделать модель более адекватной. Как нами было ранее продемонстрировано, техника построения стохастических моделей по временному ряду обладает большими возможностями прогнозирования динамики открытых систем [5, 6]. Для построения такого прогноза предложенная модель динамики ЭЭГ может быть усложнена описанными выше способами. Целью такого усложнения является получение результатов, пригодных для непосредственного клинического применения: прогнозирования состояния пациента при воздействии медикаментов, а также количественной оценки силы и направленности изменений, вызванных медикаментами.

Авторы выражают благодарность профессору, д.б.н. Г.Д. Кузнецовой и к.б.н. А.В. Габовой из Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН (Москва) за помощь в постановке задачи, комментарии экспериментальных данных и обсуждение полученных результатов, к.б.н. Е.Ю. Ситниковой из того же института за важные замечания, а также Dr. С.М. van Rijn (Radboud University, г. Наймеген, Нидерланды) за предоставленный экспериментальный материал.

Работа проведена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (госконтракт П11110).

Библиографический список

1. Koronovskii A.A., Kuznetsova G.D., Midzyanovskaya I.S., Sitnikova E.Yu., Trubetskov D.I., Hramov A. E. Regularities of alternate behavior in spontaneous nonconvulsive seizure activity in rats // *Doklady Biological Sciences*. 2006. Vol. 409. P. 275.
2. Stam C.J. Nonlinear dynamical analysis of EEG and MEG: Review of emerging field // *Clinical Neurophysiology*. 2005. Vol. 116. P. 2266.
3. Sitnikova E. Thalamo-cortical mechanisms of sleep spindles and spike-wave discharges in rat model of absence epilepsy (a review) // *Epilepsy Res*. 2010. Vol. 89. P. 17.
4. Mukhin D.N., Feigin A.M., Loskutov E.M., Molkov Ya.I. Modified Bayesian approach for the reconstruction of dynamical systems from time series // *Phys. Rev. E*. 2006. Vol. 73, № 3. P. 036211.
5. Molkov Ya.I., Mukhin D.N., Loskutov E.M., Timushev R.I., Feigin A.M. Prognosis of qualitative behavior of a system by noisy chaotic time-series // *Phys. Rev. E*. 2011. Vol. 8, № 3. P. 036215.
6. Molkov Y.I., Loskutov E.M., Mukhin D.N., Feigin A.M. Random dynamical models from time series // *Phys. Rev. E*. 2011 (*направлено в журнал*).
7. Engel J.Jr. A proposed diagnostic scheme for people with epileptic seizures and with epilepsy: report of the ILAE Task Force on Classification and Terminology // *Epilepsia*. 2001. Vol. 42, № 6. P. 796.
8. van Luijtelaar E.L., Coenen A.M. Two types of electrocortical paroxysms in an inbred strain of rats // *Neuroscience Letters*. 1986. Vol. 70, № 3. P. 393-397.
9. Bosnyakova D., Gabova A., Zharikova A., Gnezditski V., Kuznetsova G., van Luijtelaar G. Some peculiarities of time-frequency dynamics of spike-wave discharges in humans and rats // *Clinical Neurophysiology*. 2007. Vol. 118, № 8. P. 1736.
10. Abarbanel H.D.I. *Analysis of Observed Chaotic Data*. New York: Springer-Verlag, 1997.
11. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence // *Dynamical Systems and Turbulence* / Eds D.A. Rand, L.-S. Young. *Lecture Notes in Mathematics*. 1981. Vol. 898. P. 366.
12. Bracewell R. *The Fourier Transform and Its Applications*. New York: McGraw-Hill, 1999.
13. Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.-C., Tung C.C., Liu H.H. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // *Proc. R. Soc. Lond. A*. 1998. Vol. 454. P. 903.
14. Inouye T., Toi S., Matsumoto Y. A new segmentation method of electroencephalograms by use of Akaike's information criterion // *Cognitive Brain Res*. 1995. Vol. 3, № 1. P. 33.
15. *A Manual of Standardized Terminology, Techniques and Scoring System for Sleep Stages of Human Subjects* / Eds A. Rechtschaffen, A. Kales. Washington: Public Health Service, US Government Printing Office, 1968.

16. *van Rijn C. M., Gaetani S., Santolini I., Badura A., Gabova A., Fu J., Watanabe M., Cuomo V., van Luijtelaar G., Nicoletti F., Ngomba R.T.* WAG/Rij rats show a reduced expression of CB1 receptors in thalamic nuclei and respond to the CB1 receptor agonist, R(+)-WIN55,212-2, with a reduced incidence of spike-wave discharges // *Epilepsia*. 2010. Vol. 51, № 8. P. 1511.
17. *O'Mahony M.* Sensory Evaluation of Food: Statistical Methods and Procedures. University of California, Davis, USA: CRC Press, 1986.

*Институт прикладной физики РАН,
Нижний Новгород*

Поступила в редакцию 12.07.2011

RECONSTRUCTION OF AN EVOLUTION OPERATOR AS A TECHNIQUE OF ANALYSIS OF EPILEPTIFORM ELECTRIC BRAIN ACTIVITY

Yu.V. Yakhno, Ya.I. Molkov, D.N. Mukhin, E.M. Loskutov, A.M. Feigin

We propose a new method for analysis of electroencephalograms. It is based on construction of a parameterized stochastic model of the observed process (evolution operator). A certain functional form of the evolution operator is proposed. This form describes deterministic properties of the investigated process, as well as stochastic ones. The parameters of the evolution operator are reconstructed from the experimental data by using the Bayesian approach. New («fast») dynamical variables, which allow for the peculiar features of electroencephalogram, are found. They make it possible to construct the evolution operator, which describes electroencephalogram on few-second intervals. The time-varying parameters of this operator and the amplitude of oscillations in electroencephalogram form «slow» variables, which describe changes in the oscillation properties during the entire recording period. It is possible to single out individual brain states with these variables and to present a result in an obvious diagram. Moreover, changes in the singled-out brain states can be revealed. The proposed method was successfully applied to a specific physiological problem.

Keywords: Electroencephalography, time series analysis, evolution operator reconstruction.



Яхно Юрий Владимирович – родился в Горьком (1985). Окончил Нижегородский государственный университет (2008) по направлению «радиофизика». После окончания ННГУ работает в Институте прикладной физики РАН младшим научным сотрудником. Основные научные результаты опубликованы в трудах конференций.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: yuakhno@yandex.ru



Мольков Ярослав Игоревич – родился в Горьком (1974), окончил Радиофизический факультет Нижегородского государственного университета (1996). После окончания ННГУ работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИПФ РАН (2009) по специальности «радиофизика» в области нелинейной динамики. Работал научным сотрудником (postdoc) (2009–2011) в Drexel University, Philadelphia, PA, USA в области «neurophysiology and computational neuroscience». С 2011 – старший преподаватель (assistant professor of mathematics) в Indiana University Purdue University Indianapolis, IN, USA. Опубликовал 28 научных статей по направлениям, указанным выше.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: yaroslav.molkov@gmail.com



Мухин Дмитрий Николаевич – родился в Горьком (1976), окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1999). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИПФ РАН (2007) по специальности «радиофизика». В настоящее время работает в ИПФ РАН старшим научным сотрудником. Опубликовал около 40 работ по решению некорректных обратных задач и моделированию динамических систем.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: mukhin@appl.sci-nnov.ru



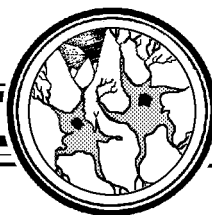
Лоскутов Евгений Михайлович – родился в Горьком (1976), окончил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (1999). В настоящее время работает в ИПФ РАН научным сотрудником. Опубликовал около 30 работ по моделированию динамических систем.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: loskutov@appl.sci-nnov.ru



Фейгин Александр Маркович – родился в Горьком (1953), окончил радиофизический факультет Горьковского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (1974). После окончания ГГУ работал в Научно-исследовательском радиофизическом институте. С 1977 года – сотрудник Института прикладной физики РАН, с 2004 года заведует отделом физики атмосферы и микроволновой диагностики. Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук в ИПФ АН (1983) по специальности «Физика плазмы» и доктора физико-математических наук (2002) по специальностям «Радиофизика» и «Физика атмосферы». Опубликовал около 50 научных статей по взаимодействию интенсивного электромагнитного излучения с плазмой, нелинейной динамике атмосферных фотохимических систем, глобальной реконструкции динамических систем по временным рядам, методам решения некорректных обратных задач, дистанционному микроволновому зондированию атмосферы.

603950 Нижний Новгород, ул. Ульянова, 46
Институт прикладной физики РАН
E-mail: feigin@appl.sci-nnov.ru



АНАЛИЗ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПРИ АБСАНС ЭПИЛЕПСИИ: ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ

Е.Ю. Ситникова, А.А. Короновский, А.Е. Храмов

Работа обобщает основные результаты анализа электроэнцефалограмм у крыс с генетической предрасположенностью к абсанс-эпилепсии (линия WAG/Rij). Описаны свойства эпилептической активности в домене частот и в домене времени, исследована динамика эпилептических разрядов, а также изменения структуры электроэнцефалограмм, предшествующие их появлению. Предложены физиологические интерпретации исследуемых явлений, которые могут способствовать лучшему пониманию природы эпилептических расстройств.

Ключевые слова: Частотно-временной анализ ЭЭГ, временная динамика эпилептической активности, сонные веретена, ритмическая активность головного мозга, осцилляторные паттерны ЭЭГ.

Введение

Работа головного мозга строится на непрерывном процессе формирования и разрушения нервных связей. «Нервные связи»* обеспечивают функциональные взаимодействия между нейронными ансамблями, расположенными в разных отделах головного мозга. Показателем установления нервных связей является синхронизация локальных электрических потенциалов головного мозга, которые можно зарегистрировать с поверхности головы (так называемая электроэнцефалограмма, ЭЭГ) [1]. На ЭЭГ можно выделить большое количество разнообразных ритмов и периодических колебаний. Частота этих ритмических составляющих ЭЭГ является важной характеристикой функциональной активности нервных структур. Частотный состав ЭЭГ, характеризующий электрическую активность локальной области головного мозга, может изменяться в зависимости от функциональной активности данной области и от характера её взаимодействий с другими областями.

*Нервные связи – понятие функциональное, однако оно имеет анатомический субстрат – синаптические контакты между нейронами.

Состояние, когда в различных областях головного мозга появляется устойчивая ритмическая активность в определенном диапазоне частот, называется состоянием синхронизации. Впервые идею о том, что синхронизация ритмов на ЭЭГ является прямым отражением установления связей между нейронами и группами нейронов, высказаны В.С. Русиновым [2]. Позднее были сформулированы представления о том, что синхронизация ритмической активности на ЭЭГ может свидетельствовать об обмене информацией между данными структурами и/или об установлении функциональных связей между ними [1,3]. Состояние синхронизации между определенными областями коры является важным атрибутом когнитивной деятельности человека.

1. Гиперсинхронизация на ЭЭГ при эпилепсии

Патологические процессы в центральной нервной системе могут сопровождаться повышением уровня синхронизации между функционально связанными структурами. В экстремальных случаях это может привести к появлению судорожных разрядов на ЭЭГ. В частности, абсанс-эпилепсия, исследованию которой посвящена данная статья, развивается на фоне гиперсинхронной активности нейронов таламо-кортикальной сети (этот вопрос освещен более подробно в разделе 4). Исследования патологической активности таламо-кортикальной системы, сопровождающие развитие абсанс-эпилепсии, скудны и немногочисленны. У человека такое исследование на базе ЭЭГ практически невозможно по этическим соображениям, поскольку оно потребует инвазивной процедуры вживления электродов в таламус, а пациенты, страдающие абсанс-эпилепсией, не имеют клинических показаний для такой операции.

Эта ситуация подтолкнула исследователей к использованию специальных линий лабораторных животных (крысы и мышей) с генетической предрасположенностью к данной форме эпилепсии. Генетические модели абсанс-эпилепсии появились сравнительно недавно, и среди них в последнее десятилетие особую популярность завоевали крысы линии WAG/Rij и GAERS [4]. Судорожная активность формируется у этих животных спонтанно (то есть без использования внешних провоцирующих факторов) и эффективно подавляется лекарственными средствами, используемыми для терапии человека.

В наших экспериментах были использованы крысы линии WAG/Rij. Регистрацию электрической активности головного мозга у животных проводили в свободном поведении с использованием вживленных электродов. Для монополярной записи ЭЭГ были использованы эпидуральные электроды, располагавшиеся во фронтальной, париетальной и затылочной коре. Операцию по вживлению проводили в возрасте от 3 до 5 месяцев под общим хлоралгидратным наркозом.

2. Клиническая и электроэнцефалографическая картина абсанс-эпилепсии

Клиническая картина абсанса у человека может напоминать кратковременную утрату внимания, рассредоточение, легкую дремоту в дневное время, поэтому существует серьезный риск, что эта болезнь останется незамеченной. Частые приступы абсанс-эпилепсии у человека приводят к снижению эффективности обучения, ухудшается общая успеваемость, что даёт почву для развития синдрома дефицита внимания и более серьезных неврологических расстройств (*comorbid conditions*).

Приступы абсанс-эпилепсии сопровождаются появлением высокоамплитудной генерализованной гиперсинхронной пик-волновой активности на ЭЭГ. Сходные абсанс-подобные состояния наблюдаются у крыс линии WAG/Rij (рис. 1).

Пик-волновые разряды на ЭЭГ человека, длительность которых не превышает 2–5 с, обычно не имеют видимых клинических проявлений. Более длительные разряды (до 15–30 с) обычно сопровождаются нарушением сознания и другими симптомами. Структура и топография пик-волновых комплексов у разных пациентов заметно варьирует. При некоторых осложненных формах эпилептических расстройств (например, абсансные судороги во время сна или появление абсанс-эпилепсии в позднем возрасте) в составе пик-волновых комплексов могут наблюдаться множественные пики. Такой энцефалографический паттерн получил название «multiple spike-and-slow-wave complexes».

На ЭЭГ у крыс линии WAG/Rij можно выделить два типа пик-волновых разрядов. К 1-му типу относится генерализованная активность, характерная для абсанс-подобных состояний. К 2-му типу относится 5–7-герцевый ритм, имеющий вид аркообразных волн с преобладанием острого позитивного компонента и локализованный в затылочной коре [5]. Клинический коррелят разрядов 2-го типа которых до сих пор неизвестен. Два типа пик-волновых разрядов отличаются по частоте и амплитуде, а также имеют разную чувствительность к нейромодуляторам и демонстрируют разную динамику в онтогенезе.

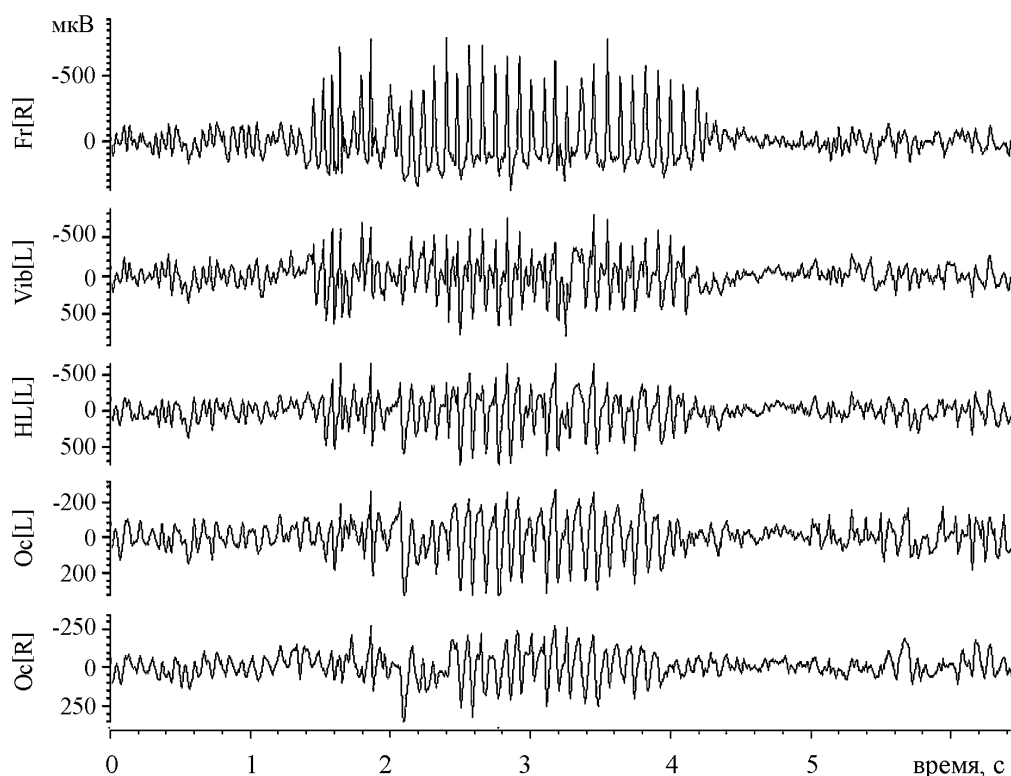


Рис. 1. Характерные для абсанс-эпилепсии гиперсинхронные пик-волновые разряды у крысы линии WAG/Rij (самец, возраст 11 мес). Обозначения каналов ЭЭГ (здесь R–right (правое полушарие), L–left (левое полушарие)): Fr[R] – лобная кора; Vib[L] – соматосенсорная кора, область вибрисс; HL[L] – соматосенсорная кора, область нижних конечностей; Oc[L] и Oc[R] – затылочная кора

Структура пик-волновых разрядов

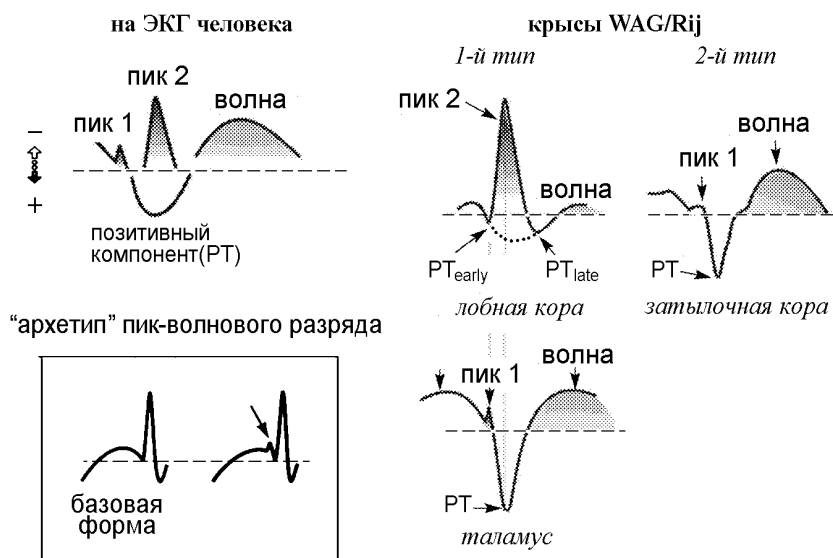


Рис. 2. Пик-волновой комплекс человека состоит из так называемых «эпилептиформных элементов» (по определению Weir, 1965): пик 1 – ранний негативный пик, РТ – позитивный компонент; пик 2 – поздний высокоамплитудный пик и негативная «волна». Данная схема применима к пик-волновым разрядам крыс линии WAG/Rij, у которых разряды 1 и 2-го типов состоят из элементов, аналогичных таковым у человека [6]

Было проведено электроэнцефалографическое исследование формы потенциала пик-волновых разрядов обоих типов у крыс линии WAG/Rij в соответствии со схемой, принятой в клинической электроэнцефалографии [6]. В результате было выявлено несколько эпилептиформных элементов в составе пик-волновых разрядов: «пик 1», «пик 2», «позитивный компонент» и «волна» (рис. 2). Показано, что пик-волновые разряды у крыс линии WAG/Rij состоят из элементов, характерных для пик-волновых комплексов человека. Это свидетельствует о аналогичных проявлениях судорожной активности у данной генетической модели (крысы линии WAG/Rij) и у пациентов с абсанс-эпилепсией.

Каждый отдельный цикл пик-волнового комплекса содержит один пик и одну волну. Увеличение числа пиков в составе пик-волнового комплекса до трех и более на одну волну свидетельствует о неблагоприятном прогнозе. Известно, что появление множественных пиков в составе пик-волновых комплексов вызвано нарушением внутрикорткальных взаимосвязей и повышением возбудимости кортикальных нейронов. Сложная структура пик-волновых разрядов, по всей вероятности, является отражением локальных процессов возбуждения-торможения в коре во время абсанс-эпилепсии и в большой степени зависит от уровня синхронизации нейронной активности или от уровня возбуждения, поступающего из подкорковых структур (таламуса).

3. Диагностика начала абсанс-эпилепсии с использованием данных ЭЭГ

Особенностью абсанс-эпилепсии у человека является отсутствие клинических и электроэнцефалографических признаков, по которым можно было бы предсказать начало эпилептических разрядов. По-видимому, состояние, предшествующее гиперсинхронным пик-волновым разрядам, формируется под влиянием совокупности раз-

нообразных факторов, контролирующих внутренние процессы в нервной системе (возбудимость нейронов), а также внешних факторов (медикаментозное вмешательство, изменение длительности и качества сна и т.п.). У больных эпилепсией в некоторых случаях удавалось зафиксировать некоторые изменения формы, амплитуды и частоты фоновой ЭЭГ за несколько секунд до начала пик-волновых разрядов, свидетельствующие о небольшом снижении уровня бодрствования, на фоне которого возникали гиперсинхронные разряды. Никаких особых изменений на ЭЭГ перед началом судорожной активности обнаружено не было.

Непрерывный вейвлетный анализ пик-волновых разрядов, проведенный нами с помощью комплексного вейвлета Морле [8], показал, что появлению пик-волновых разрядов на ЭЭГ предшествовала совокупность коротких ритмических компонентов, максимальная мощность которых в диапазоне дельта 3–5 Гц и тета/альфа-частот 7–11 Гц (рис. 3) [9]. Низкочастотные, то есть дельта-компоненты, предшествовали приблизительно 90% пик-волновых разрядов, тета/альфа-компоненты – 92%. Средняя длительность предшественников разрядов составляла примерно полсекунды. Лишь у 5% пик-волновых разрядов ритмические предшественники на ЭЭГ отсутствовали. Эти разряды появлялись на ЭЭГ на фоне десинхронизации. В 89% случаев перед началом пик-волновых разрядов обнаруживали оба компонента (дельта и тета/альфа). Такая ситуация была нетипична для фоновой ЭЭГ. Эпизоды времени, на протяжении которых дельта- и тета-компоненты присутствовали одновременно на фоновой ЭЭГ, составляло около 2–12% от общего числа проанализированных эпох (табл.).

Если тета/альфа-компонент обнаруживался в коре и в таламусе практически одновременно, тогда дельта-компонент появлялся в таламусе с небольшой, но достоверной задержкой относительно коры (примерно, 0,5 с). Появление дельта-активности в коре до начала пик-волнового разряда может служить своеобразным триггером, при срабатывании которого таламо-кортикальная сеть переходит в режим генерации гиперсинхронного эпилептического ритма. Более подробное обсуждение

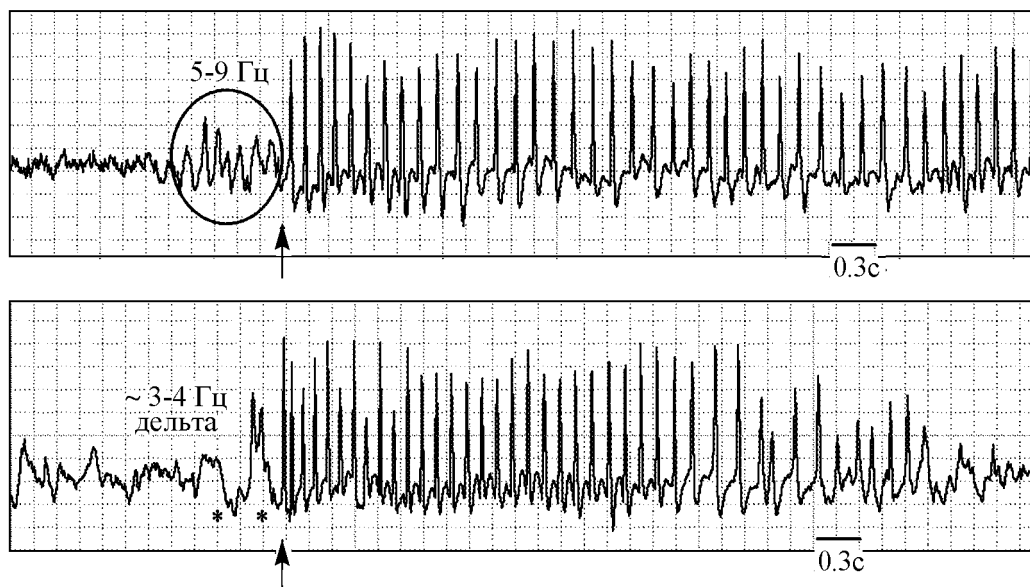


Рис. 3. Особенности структуры ритмической активности на ЭЭГ непосредственно перед началом пик-волновых разрядов (обозначено стрелочками). Наиболее типичным является наличие осцилляций в диапазоне 5–9 Гц (тета/альфа-предшественник), а также 3–4 Гц компонента (дельта-предшественник)

Таблица

Одновременное появление дельта- и тета/альфа-компонентов на ЭЭГ у крыс линии WAG/Rij

Физиологическое состояние	% дельта+тета/альфа-компонентов
Перед началом эпилептических разрядов	79.0
Активное бодрствование	8.6
Пассивное бодрствование	12.9
Поверхностный сон	9.3
Глубокий сон	2.2

нейронных механизмов формирования медленно-волнового компонента и эпилептогенной природы дельта-предшественника представлено в работе [9].

Описанный нами тета/альфа-предшественник, средняя частота которого составила 8.6 Гц, в определенном смысле может оказаться аналогом 5–9-герцевого предвестника эпилептических разрядов, описанного ранее у крыс линии GAERS [10]. Что касается медленно-волнового предшественника абсанс-эпилепсии, то это совершенно новый проэпилептический элемент на ЭЭГ. О существовании подобного элемента нет упоминаний ни в работах на крысах линии GAERS, ни на других моделях, ни на человеке.

4. Системные механизмы таламо-кортикальных осцилляций

Помимо пик-волновых разрядов, таламо-кортикальная нервная сеть генерирует нормальные осцилляции – сонные веретена во время медленной фазы сна (рис. 4). Необходимо отметить, что таламо-кортикальные осцилляции (и нормальные, и патологические) имеют частоту 8–14 Гц, что соответствует диапазону альфа-частот. Известно, что неокортекс играет ключевую роль в формировании пик-волновых разрядов, а таламус генерирует сонные веретена. Осцилляции обоих типов поддерживаются и контролируются нейросетевыми механизмами таламо-кортикальной сети и способны распространяться за её пределы благодаря анатомическим связям с другими областями головного мозга.

При исследовании характера распределения стереотипных таламо-кортикальных осцилляций на ЭЭГ мы использовали математический аппарат нелинейной динамики и теории динамического хаоса [11], которые оперируют понятием «*on-off*»

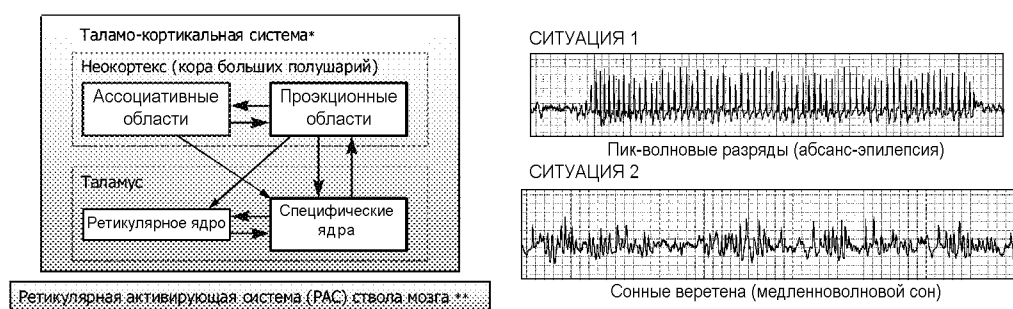


Рис. 4. Схема таламо-кортикальной сети, участвующей в формировании сонных веретен и пик-волновых разрядов. В модели «*on-off* переменяемости» таламо-кортикальная система соответствует осциллирующей подсистеме (*), а ретикулярная активирующая система соответствует управляющей подсистеме (**)

перемежаемости» [11–13]. Этот подход применяется в физике для описания последовательности чередующихся нерегулярных событий на фоне относительно стабильной активности вблизи точек бифуркаций. В нашем случае была исследована электрическая активность коры больших полушарий, где длительные эпизоды низкоамплитудной полиритмической активности (фоновая ЭЭГ) чередовались с всплесками высокоамплитудной активности с относительно стабильной частотой, которые соответствовали либо эпилептическим разрядам, либо сонным веретенам. У каждого животного (всего 6 крыс) исследовали закономерности распределения значений периодов времени L между событиями, то есть между эпилептическими разрядами либо между сонными веретенами. Статистическое распределение величин L было аппроксимировано степенной функцией $N(L) = DL^a$, где $N(L)$ – количество интервалов длительностью L в заданном диапазоне, D – параметр нормирования. Показатель степени « a » подбирался так, чтобы ошибка аппроксимации была минимальной. Анализ большого количества экспериментальных данных показал, что распределение интервалов длительностью L между пик-волновыми разрядами и типичными сонными веретёнами соответствовало степенной функции с показателем степени $a = -3/2$, что характерно для «*on-off* перемежаемости». Технические аспекты этого исследования подробно изложены в работах [14–16] и в обзоре [17].

Для более полного понимания природы этого явления с позиции нейрофизиологии, предлагаем следующее объяснение данного феномена.

Из теории динамических систем и нелинейной динамики известно, что система, в которой возникает «*on-off* перемежаемость», может иметь иерархическую организацию и состоять из двух подсистем: управляющий и управляемой. В нашем случае, управляемой (осциллирующей) подсистемой является таламо-кортикальная сеть, которая способна генерировать сонные веретена, находясь в состоянии синхронизации, или пик-волновые разряды – в состоянии гиперсинхронизации (см. рис. 4). Вторая (управляющая) подсистема принадлежит к более высокой иерархии. Эта роль может принадлежать ретикулярной активирующей системе ствола мозга, поскольку именно эта система регулирует процессы сна и бодрствования, постоянно «подбуживая» кору и таламус и таким образом поддерживая состояние бодрствования. При снижении влияния ретикулярной активирующей системы нейроны таламуса переходят в режим генерации «пачек» импульсов. Уровень синхронизации в таламо-кортикальной сети постепенно возрастает, формируется состояние сна, и на ЭЭГ появляется сонно-веретённая активность. Управляющая подсистема влияет на состояние осциллирующей подсистемы посредством контролирующих параметров, которыми могут являться нейромедиаторы (ацетилхолин и норадреналин). Их концентрация снижается по мере снижения уровня бодрствования. Когда концентрация нейромедиаторов окажется ниже порогового значения, поведение таламо-кортикальной системы принципиально изменяется: тоническая активация нейронов сменяется «пачечной» активностью. Дальнейшая ситуация может развиваться по двум сценариям в зависимости от чувствительности нейронов коры к влиянию ретикулярной активирующей системы ствола мозга. Сонные веретена (Ситуация 2 на рис. 4) появляются, когда нейроны коры обладают высокой чувствительностью к снижению холин- и адренэргической иннервации. В этом случае главную роль в формировании сонных веретен играет таламус, а возбудимость коры остается низкой. Если нейроны коры оказываются менее чувствительны к снижению холин- и адренэргической иннервации, возбудимость коры сохраняется на высоком уровне, и в ответ на «пачки» импульсов от таламуса нейроны коры могут генерировать гиперсинхронные разряды (Ситуация 1 на рис. 4).

Заключение

Использование мощных средств физико-математического анализа применительно к ЭЭГ в настоящее время даёт возможность установить сложные закономерности работы мозга. Однако трактовка результатов математического анализа с позиций нейробиологии зачастую оказывается сложной и неоднозначной. Результат, столь очевидный для математика, может показаться физиологу лишённым смысла и поставить его (физиолога) в тупик. Сложности в интерпретации результатов математического анализа обусловлены некоторым отчуждением, которое до сих пор существует между биологическими и физико-математическими науками. Хотелось бы верить, что новые знания, рожденные на стыке этих фундаментальных наук, будут способствовать росту взаимопонимания и взаимопроникновению этих дисциплин и, в конечном итоге, помогут решить многочисленные загадки ЭЭГ.

Как справедливо заметили А.М. Иваницкий и А.И. Лебедев [18, с. 639] в статье о научном наследии М.Н. Ливанова: «Наибольший эффект от соединения математики и физиологии получается тогда, когда в основе применения того или иного математического преобразования лежит плодотворная физиологическая идея». Действительно залогом успеха междисциплинарного направления в современной нейробиологии является четкость и осмысленность в постановке физиологических задач.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 09-04-01302-а), а также Президентской Программы поддержки ведущих научных школ Российской Федерации. А.А. Короновский благодарит фонд некоммерческих программ «Династия».

Библиографический список

1. Ливанов М.Н. Пространственная организация процессов головного мозга. М.: Наука, 1972. 181 с.
2. Русинов В.С. Некоторые вопросы теории электроэнцефалограммы. Физиология. Л., 1954. С. 235.
3. Свидерская Н.Е. Синхронная электрическая активность мозга и психические процессы. М.: Наука, 1987. 156 с.
4. Depaulis A., van Luijtelaar E.L.J.M. Genetic models of absence epilepsy in the rat // Models of seizures and epilepsy. Amsterdam: Elsevier Academic Press, 2005. P. 233.
5. Мидзяновская И.С. Два типа разрядов «пик-волна» на электроэнцефалограмме крыс линии WAG/Rij, генетической модели absence эпилепсии // Журн. высш. нерв. деят. 1999. Т. 49, № 5. С. 855.
6. Weir B. The morphology of the spike-wave complex // Electroencephalogr. Clinical Neurophysiol. 1965. Vol. 19. P. 284.
7. Sitnikova E., van Luijtelaar G. Electroencephalographic characterization of spike-wave discharges in cortex and thalamus in WAG/Rij rats // Epilepsia. 2007. Vol. 48, № 12. P. 2296.

8. *Короновский А.А., Храмов А.Е.* Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения. М.: Физматлит, 2003.
9. *van Luijteleaar G., Hramov A., Sitnikova E., Koronovsky A.* Spike-wave discharges in WAG/Rij rats are preceded by delta and theta precursor activity in cortex and thalamus // *Clin. Neurophysiol.* 2011. Vol. 122, № 4. P. 687.
10. *Pinault D., Vergnes M., Marescaux C.* Medium-voltage 5–9 Hz oscillations give rise to spike-and-wave discharges in a genetic model of absence epilepsy: In vivo dual extracellular recording of thalamic relay and reticular neurons // *Neurosci.* 2001. Vol. 105. P. 181.
11. *Кузнецов С.П.* Динамический хаос. Курс лекций. М.: Физматлит, 2001.
12. *Heagy J.F., Platt N., Hammel S.M.* Characterization of on–off intermittency // *Phys. Rev. E.* 1994. Vol. 49. P. 1140.
13. *Platt N., Spiegel E. A., Tresser C.* On-off intermittency: A mechanism for bursting // *Phys. Rev. Lett.* 1993. Vol. 70. P. 279.
14. *Короновский А.А., Минюхин И.М., Тыщенко А.А., Храмов А.Е., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., van Luijteleaar G., van Rijn C.M.* Применение непрерывного вейвлет-преобразования для анализа перемежающегося поведения // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2007. Т. 15, № 4. С. 34.
15. *Короновский А.А., Кузнецова Г.Д., Мидзяновская И.С., Ситникова Е.Ю., Трубецков Д.И., Храмов А.Е.* Закономерности перемежающегося поведения в спонтанной неконвульсивной судорожной активности у крыс // *ДАН.* 2006. Т. 409. С. 274.
16. *Hramov A.E., Koronovskii A.A., Midzyanovskaya I.S., Sitnikova E., van Rijn C.M.* On-off intermittency in time series of spontaneous paroxysmal activity in rats with genetic absence epilepsy // *Chaos.* 2006. Vol. 16. P. 043111.
17. *Короновский А.А., van Luijteleaar G., Овчинников А.А., Ситникова Е.Ю., Храмов А.Е.* Диагностика и анализ осцилляторной нейросетевой активности головного мозга с использованием непрерывного вейвлетного преобразования // *Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика.* 2011. Т. 19, № 1. С. 86.
18. *Иваницкий А.М., Лебедев А.И.* Разгадывая тайны ритмов мозга // *Журн. высш. нервн. деят.* 2007. Т. 57, № 5. С. 636.

*Институт высшей нервной деятельности Поступила в редакцию 30.06.2011
и нейрофизиологии РАН, Москва
Саратовский госуниверситет*

ANALYSIS OF EPILEPTIC ACTIVITY OF BRAIN IN CASE OF ABSENCE EPILEPSY: APPLIED ASPECTS OF NONLINEAR DYNAMICS

E.Yu. Sitnikova, A.A. Koronovskii, A.E. Hramov

The paper summarizes the main results of analysis of electroencephalograms in rats with genetic predisposition to absence epilepsy (WAG/Rij rat strain). Properties of epileptic activity are described in time and in frequency domains; dynamics of epileptic

activity is investigated, as well as changes in electroencephalogram structure prior to epileptic discharges. Physiologic interpretation of the investigated phenomena helps in better understanding of the nature of the investigated phenomena.

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



Ситникова Евгения Юрьевна – родилась в Волгограде (1974). Окончила ветеринарно-биологический факультет Московской академии ветеринарной медицины и биотехнологии им. К.И.Скрябина (1996), кандидат биологических наук (специальность 03.00.13 - физиология), PhD (Social science, Radboud University Nijmegen, Нидерланды, 2008). Старший научный сотрудник Учреждения Российской Академии Наук Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН. Научные интересы - междисциплинарные исследования функций мозга. Автор около 40 научных работ, опубликованных в отечественных и международных журналах.

117485 Москва, ул. Бултерова, 5А
Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН
E-mail: eu.sitnicova@gmail.com



Короновский Алексей Александрович – родился в Саратове (1972). Окончил физический факультет Саратовского государственного университета (1995), доктор физико-математических наук (2007), профессор кафедры физики открытых систем СГУ. Область научных интересов – синхронизация, нелинейная динамика и ее проявления в различных сферах человеческой деятельности, в том числе нелинейная динамика социально-экономических процессов. Автор ряда статей в центральной печати, а также монографий (в соавторстве) «Нелинейная динамика в действии» и «Непрерывный вейвлетный анализ», вышедших в Издательстве ГосУНЦ «Колледж», двухтомной монографии «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009, под редакцией А.А. Короновского, А.А. Кураева, Д.И. Трубецкова и А.Е. Храмова), монографии «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010, под редакцией С.И. Ильина и Д.И. Трубецкова) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: alkor@nonlin.sgu.ru



Храмов Александр Евгеньевич – окончил физический факультет Саратовского госуниверситета (1996). Защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата (1999) и доктора (2006) физ.-мат. наук. Профессор, заместитель заведующего кафедрой электроники, колебаний и волн факультета нелинейных процессов СГУ. Область научных интересов – радиофизика в той ее части, которая связана со взаимодействием свободных электронов с электромагнитными полями, нелинейная динамика распределенных активных сред, методы анализа и моделирования динамических систем. Опубликовал (в соавторстве) книгу «Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков» (Т. 1, М.: Физматлит, 2003; Т. 2, М.: Физматлит, 2004), монографию «Непрерывный вейвлетный анализ и его приложения» (Москва: Наука, Физматлит, 2003), двухтомную коллективную монографию «Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот» (М.: Физматлит, 2009), коллективную монографию «Моделирование нелинейной динамики глобальных процессов» (М.: Изд-во МГУ, 2010) и др.

410012 Саратов, ул. Астраханская, 83
Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: aeh@nonlin.sgu.ru



Международная молодежная конференция

**НЕЛИНЕЙНАЯ ДИНАМИКА
В КОГНИТИВНЫХ ИССЛЕДОВАНИЯХ – 2011**

Нижний Новгород, Россия, 18–21 июня 2011

Организаторы

• Российская академия наук, • Институт прикладной физики, • Центр оптико-нейронных технологий НИИ системных исследований, • Межрегиональная ассоциация когнитивных исследований, • ЗАО «Нижегородское агентство наукоемких технологий», • Стратегическое общественное движение «Россия – 2045», • Нижегородская государственная медицинская академия, • Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского.

Программный комитет

Председатель: Александров Ю.И., Институт психологии РАН, Москва

Заместители председателя: Анохин К.В., ГУ НИИ нормальной физиологии РАН, Центр нано-, био-, инфо-, когнитивных наук и технологий Научно исследовательского центра «Курчатовский институт», Курчатовский НБИК-центр; Величковский Б.М., Курчатовский НБИК-центр; Кибрик А.А., МГУ; Крыжановский Б.В., Центр оптико-нейронных технологий НИИ-СИ РАН; Сергеев А.М., ИПФ РАН; Черниговская Т.В., СПбГУ, Курчатовский НБИК-центр

Члены программного комитета: Антонец В.А., ИПФ РАН; Бедный Б.И., ННГУ; Владимирский Б.М., НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону; Гурбатов С.Н., ННГУ; Григорьева В.Н., НГМА, Н. Новгород; Дунин-Барковский В.Л., Центр оптико-нейронных технологий НИИ-СИ РАН; Жданов А.А., ИТМиВТ РАН, Москва; Еськов В.М., Сургутский государственный университет; Иваницкий А.М., ИВНДиНФ РАН; Кондратьев В.В., Политехнический университет, Н. Новгород; Крылов А.К., Институт психологии РАН; Подладчиков Л.Н., НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону; Полевая С.А., ННГУ; Редько В.Г., Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН; Соловьев В.Д., Казанский государственный университет; Станкевич Л.А., СПбГПУ, СПб Информатики и автоматизации РАН; Самарин А.И., НИИ НК ЮФУ, Ростов-на-Дону; Шахов Б.Е., НГМА, Н. Новгород; Щербаков В.И., НГПУ, Н. Новгород; Яхно В.Г., ИПФ РАН

Рабочий оргкомитет

Сергеев А.М., ИПФ РАН, председатель; Яхно В.Г., ИПФ РАН, зам. председателя; Антонец В.А., ИПФ РАН; Беллюстин Н.С., НИРФИ, Н. Новгород; Воловик М.Г., НижНИИТиО Минздравсоцразвития, Н. Новгород; Казанцев В.Б., ИПФ РАН; Ковальчук А.В., ИПФ РАН; Нуйдель И.В., ИПФ РАН, ученый секретарь конференции; Парин С.Б., ННГУ; Полевая С.А., НГМА, Н. Новгород; Соколов М.Е., ИПФ РАН; Тельных А.А., ИПФ РАН; Шемагина О.В., ИПФ РАН

Рабочая программа

18 июня 2011

Открытие конференции

Вступительное слово. *А.Г. Литвак* (академик РАН), *Т.В. Черниговская* (профессор), *Ю.И. Александров* (профессор), *А.М. Сергеев* (член-корр. РАН)

Лекции

Александров Ю.И. (Институт психологии РАН, Москва). Познание: Взгляд изнутри и извне
Черниговская Т.В. (Санкт-Петербургский университет; НБИК-центр НИЦ «Курчатовский институт», Москва). Где течет время: Взгляд из когнитивной науки
Жаботинская С.А. (Черкасский национальный университет, Украина). Элементарный код и динамика концептуальных структур (данные естественного языка)
Зорина З.А. (Московский государственный университет). О биологических предпосылках речи человека
Полевая С.А., Зевеке А.В. (Нижегородская государственная медицинская академия). Очувствленная кожа: Специфичность паттернов вместо специфичности рецепторов
Григорьева В.Н., Нестерова В.Н., Полевая С.А. (Нижегородская государственная медицинская академия). Ошибки в выполнении координированных сознательных произвольных движений рук при повреждениях мозга: Количественные критерии диагностики кинестетической апраксии

Секция 1. Фундаментальные и прикладные аспекты когнитивной науки

Председатель профессор *В.Г. Яхно*

Анохин К.В. (НИИ нормальной физиологии РАМН, НБИК-центр НИЦ «Курчатовский институт», Москва). Теория функциональных систем и проблема происхождения адаптивной организованности нервной системы
Витяев Е.Е. (Институт математики СО РАН, Новосибирск). Когнитивная архитектура работы мозга, основанная на теории функциональных систем П.К. Анохина
Дунин-Барковский В.И. (Центр оптико-нейронных технологий НИИСИ РАН, Москва). Бугорковые аттракторы и понимание механизмов мозга
Эйнгорин М.Я. (ННГУ, НИИОКП «Скит», Н. Новгород). Дискретное моделирование как метод развития научно-технических систем
Подладчиков Л.Н., Тикиджи-Хамбурьян Р.А., Белова Е.И., Ищенко И.А. (НИИ нейрокибернетики ЮФУ, Ростов-на-Дону). Возможные механизмы интеграции активности гетерогенных нейронов в функциональных колонках зрительной коры мозга

Секция 2. Фундаментальные и прикладные аспекты когнитивной науки

Председатель профессор *Ю.И. Александров*

Николаева Е.И., Вергунов Е.Г. (РГПУ, Санкт-Петербург). Использование программы «surfer» для визуализации разнообразия реакции у детей
Смолянинов В.В. (ИТЭБ РАН, Пущино-на-Оке). Когнитивные парадигмы
Синеокова Т.Н. (Нижегородский государственный лингвистический университет). Лингвистические методы регистрации измененных состояний сознания
Савченко В.В., Акатьев Д.Ю. (Нижегородский государственный лингвистический университет). Технология обучения и тестирования речи на основе когнитивной кластерной модели минимальных речевых единиц
Савченко А.В. (Нижегородский филиал государственного университета «Высшая школа экономики»). Теоретико-информационный подход к коллективному распознаванию образов

19 июня 2011

Лекции

Чернавский Д.С., Чернавская О.Д., Карп В.П., Никитин А.П. (Физический институт РАН, Москва; МИРЭА, Москва; ИОФ РАН, Москва). Об архитектуре конструкции из нейропроцессоров, способной решать основные задачи мышления
Сварник О.Е., Александров Ю.И. (Институт психологии РАН, Москва). Этапы формирования сложного инструментального навыка и их нейронное обеспечение

Станкевич Л.А., Казанский А.Б. (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет; Институт эволюционной физиологии и биохимии, Санкт-Петербург). Когнитивная робототехника и искусственная эволюция

Хилько А.И., Яхно В.Г., Хоботов А.Г., Смирнов И.П., Бурдуковская В.Г., Коваленко В.В., Хилько А.А., Романова В.И. (ИПФ РАН). Когнитивный симулятор активной автономной системы дистанционного наблюдения в неоднородной гестационарной природной среде
Яхно В.Г. (ИПФ РАН). Проблемы на пути конструирования симулятора живых систем

Секция 3. Моделирование когнитивных функций

Председатель профессор *Г.А. Иваницкий*

Бодякин В.И. (Институт проблем управления РАН, Москва). Механизм автоматического формирования информационной модели в информационно-управляющей системе, построенной на базе нейросемантической парадигмы

Воловик М.Г., Макаренко А.В., Правдивцев А.В. (Нижегородский НИИ травматологии и ортопедии; Научно-исследовательская группа «Конструктивная Кибернетика», Москва). Подходы и методы моделирования и исследования ИК-термокарт головного мозга человека

Котов А.А. (НБИК-центр НИЦ «Курчатовский институт», Москва). Моделирование коммуникативных колебаний и сомнений эмоциональным компьютерным агентом

Редько В.Г. (НИИСИ РАН, Москва). Зачем и как моделировать когнитивную эволюцию

Крылов А.К., Александров Ю.И. (Институт психологии РАН, Москва). Нелинейная структура индивидуального опыта и фрактальный анализ поведения модели

Хоботов А.Г., Хилько А.И., Романова В.И., Яхно В.Г. (ИПФ РАН) Обработка сложных сигналов нейроноподобными структурами

Секция 4. Моделирование когнитивных функций

Председатель профессор *Л.А. Станкевич*

Чернавская О.Д., Чернавский Д.С., Карп В.П., Никитин А.П. (Физический институт РАН, Москва; МИРЭА, Москва; ИОФ РАН, Москва). О возможном механизме перехода «образ↔символ» на нейропроцессорах

Карп В.П. (Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики, Москва). Интеллектуальный анализ данных в проблеме формализации интуитивных знаний эксперта

Цукерман В.Д., Каримова О.В., Еременко З.С., Кулаков С.В., Сазыкин А.А. (НИИ нейрокибернетики ЮФУ, Ростов-на-Дону). Два гиппокампа – две когнитивные концепции навигации
Кузнецова Г.Д., Нуйдель И.В., Соколов М.Е. (Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва; ИПФ РАН). Симулятор динамических процессов преобразования сенсорных сигналов в таламо-кортикальных сетях

Сергиевский Г.М. (НИЯУ «МИФИ», Москва). Проблемы и подходы к моделированию и обучению

Выгоняйлова О.Б., Пантелеева С.Н., Резникова Ж.И. (Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск). Когнитивные аспекты межвидовых отношений: полевые мыши принимают решение «охотиться или убежать» на основе оценки количества объектов
Сухов В.С. (ННГУ). Математическое моделирование генерации электрических реакций растений

Рабочее совещание

Обсуждение докладов стендовых сессий

Проблемы моделирования и разработки симуляторов живых систем

20 июня 2011

Лекции

Ратушняк А.С., Проскура А.Л., Малахин И.А., Запара Т.А. (Конструкторско-технологический институт вычислительной техники СО РАН, Новосибирск). Теоретико-экспериментальный анализ межмолекулярных взаимодействий при реализации нейроном информационных функций

Иваницкий Г.А., Роик А.И. (Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва). Когнитивное пространство и ритмы мозга

Антонец В.А., Левчук И.В. (ИПФ РАН; ННГУ). Моделирование оценки значимости семантически разнородных объектов

Воденев В.А. (ННГУ) Электрические сигналы у растений
Каплан А.Я., Басюл И.А., Кочетова А.Г. (МГУ) Проблема создания гибридных интерфейсов
«мозг-глаз-компьютер»

Секция 5. Инструментальные методы в когнитивных исследованиях

Председатель профессор *В.А. Антонец*

Дорошева Е.А. (Институт систематики и экологии животных СО РАН, Новосибирск). Механизмы актуализации в онтогенезе врожденных образов биологически значимых объектов: Модель «хищник–жертва» и межвидовые конкурентные отношения)

Щербакова О.В. (Санкт-Петербургский государственный университет). Метакогнитивная регуляция интеллектуальной деятельности

Лобов С.А., Казанцев В.Б. (ИПФ РАН; ННГУ). Адаптивные перестройки в модели пластичной нейрональной сети под воздействием длительной стереотипной стимуляции

Котов А.А. (РГТУ, Москва; НИУ «Высшая школа экономики», Москва) Формирование понятий: Системы научения и роль знака

Парин С.Б., Чернова М.А., Полевая С.А. (ННГУ; НИИ прикладной и фундаментальной медицины Нижегородской государственной медицинской академии; ИПФ РАН). Активное управление сигналами о рассогласовании в когнитивной системе

Секция 6. Нелинейные методы исследования в электроэнцефалографии

Председатель профессор *А.Я. Каплан*

Овчинников А.А., Евстигнеева Т.П., Короновский А.А., Ситникова Е.Ю., Мантуров А.О., Храмов А.Е. (Саратовский государственный университет; Саратовский областной медицинский диагностический центр; Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва; Саратовский государственный технический университет). Динамика развития гиперсинхронных эпилептических разрядов на ЭЭГ у больных абсанс-эпилепсией

Яхно Ю.В., Мольков Я.И., Фейгин А.М., Мухин Д.Н., Кузнецова Г.Д., Габова А.В., С.М. van Rijn (ИПФ РАН; Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва; Donders Institute for Brain, Cognition and Behaviour, Radboud University, Nijmegen, the Netherlands). Исследование электрической активности мозга при эпилепсии с помощью стохастического моделирования

Ситникова Е.Ю., Короновский А.А., Храмов А.Е. (Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва; Саратовский государственный университет). Анализ ритмической активности головного мозга при абсанс-эпилепсии: Работа с электроэнцефалограммами

Казмирова Е.Д. (ЗАО «Лаборатория Касперского», Москва). Мозг как информационно-биологическая система: О возможных механизмах работы мозга со сложными образами

Круглый стол

Обсуждение докладов стендовых сессий

Обсуждения в рабочих группах базовых тематик исследований

21 июня 2011

Круглый стол

Обсуждение итогов конференции

Перспективы разработок симуляторов живых систем

Заседание рабочей группы «Россия-2045»

Заккрытие конференции

Результаты заявленных докладов представлены в трудах конференции: Научное издание «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011». Материалы международной молодежной конференции / Рос. акад. наук, Ин-т приклад.физики [и др.] Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. 312 с. (Объем 19,75 печатных листа, тираж 200 экз.); Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011: Труды конференции / Рос. акад. наук, Ин-т приклад.физики [и др.] Нижний Новгород: ИПФ РАН, 2011. 264 с. (Объем 33 печатных листа, тираж 200 экз.).

Из аналитического обзора

В соответствии с планом Российской академии наук в ИПФ РАН и при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. контракт № 14.741.11.0159) и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 11-07-99700 р_г) была организована и проведена Конференция, посвященная обсуждению новых возможностей экспериментального исследования и формализованного описания когнитивных процессов, а также текущего состояния дел и перспективы создания симуляторов живых систем.

II Международная молодежная конференция «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» явилась логическим продолжением I Всероссийской конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях», проведенной 13–15 мая 2009 года на базе Института прикладной физики РАН. Так как одним из организаторов конференции выступил Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, оргкомитетом было принято решение провести в рамках конференции Лекторий для студентов и Стендовую молодежную сессию. В конференции приняли участие не только российские, но и зарубежные ученые, поэтому она приобрела статус Международной молодежной конференции.

В Международной молодежной конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях» приняли участие более 200 ученых и активных слушателей (из них 130 исследователей моложе 35 лет), были представлены доклады сотрудников 64 организаций России и 7 иностранных государств.

В Нижегородском государственном университете был также организован лекторий по когнитивной науке. В нем приняли участие 130 человек до 35 лет. С лекциями выступили: профессор *Т.В. Черниговская* (СПбГУ) «Интеллект будущего: Как исследования мозга изменят жизнь в XXI веке?»; профессор *З.А. Зорина* (МГУ) «Высшие когнитивные функции у животных: Истоки человеческой речи»; профессор *Ю.И. Александров* (Институт психологии РАН, Москва) «Культурно-историческая психология и нейронаука»; профессор *С.А. Жаботинская* (Черкасский национальный университет, Украина) «Зарубежные школы когнитивной лингвистики».

Проблематика исследований. Целями конференции было активное обсуждение учеными новых возможностей экспериментального исследования и формализованного описания когнитивных процессов, а также текущего состояния дел и перспектив создания симуляторов живых систем. Основные вопросы, которым было уделено внимание на конференции:

- рассмотрение и описание динамических процессов обработки информации, аналогичных используемым в мозге,
- механизмы познания, включая эмоции и сложные формы поведения,
- процессы восприятия и осознания сенсорных сигналов,
- формирование баз данных,
- воспроизведение ранее существовавших и приобретаемых знаний на формализованных функциональных моделях,
- использование симуляторов для регистрации основных параметров, определяющих функциональное состояние исследуемых живых систем, предсказания их возможного поведения и динамики реагирования в различных сигнальных ситуациях.

Научная тематика конференции

1. Модели адаптивных процессов и режимов осознания сенсорных сигналов в когнитивных системах.
2. Инструментальные средства регистрации различных стадий (этапов) динамики функционального состояния живых систем и технических систем распознавания.
3. Прикладные результаты, связанные с модельными описаниями и инструментальными средствами регистрации процессов в когнитивных исследованиях.

Итоги конференции. На Международной молодежной конференции «Нелинейная динамика в когнитивных исследованиях – 2011» состоялось активное обсуждение молодыми исследователями и состоявшимися учеными новых возможностей экспериментального изучения и формализованного описания когнитивных процессов, а также текущего состояния дел и перспектив создания симуляторов живых систем. Один из основных результатов Конференции – эффективное освоение молодыми исследователями и преподавателями лучших научных и методических отечественных и мировых достижений в области междисциплинарной когнитивной науки, в основе которой лежит сотрудничество нейробиологов, психологов, лингвистов, медиков, физиков, математиков и инженеров.

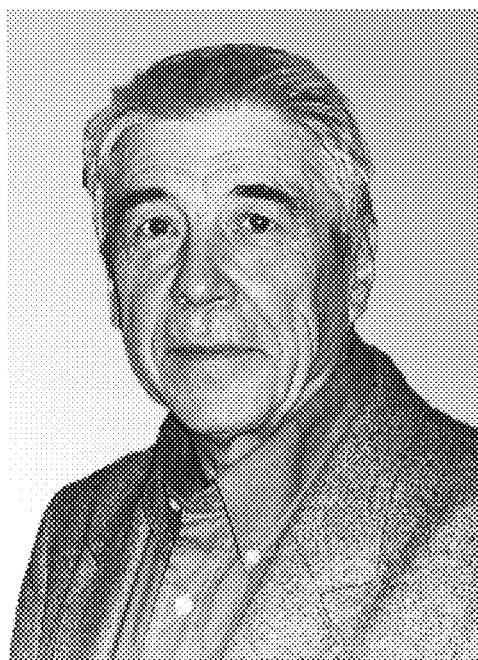
Ход и итоги конференции активно обсуждались в средствах массовой информации федерального, регионального и институционального уровней. Конференция при соответствующей организационной и финансовой поддержке может стать традиционной.

В результате обсуждений на круглых столах были согласованы следующие решения конференции.

1. Данные докладов, представленных на конференции, подтвердили мировой уровень результатов, существование научной основы, а также техническую реализуемость симуляторов живых систем, позволяющих: а) проводить рассмотрение и описание динамических процессов обработки информации, аналогичных используемым в мозге; б) исследовать механизмы познания, включая эмоции и сложные формы поведения; в) изучать процессы восприятия и осознания сенсорных сигналов; г) использовать симуляторы для регистрации основных параметров, определяющих функциональное состояние исследуемых живых систем, и предсказания их возможного поведения в различных сигнальных ситуациях; и ряд других областей исследования.
2. Участники конференции подчеркивают необходимость формирования рабочих групп из заинтересованных разработчиков. Одна из рабочих групп ориентирована на формирование модельных описаний и разработку инструментальных (операционных) систем для симуляторов живых систем. Предлагается, чтобы демонстрационные модули реализовывались в открытой среде, на операционной системе LINUX, в которой можно собирать модули симуляции, написанные разными группами разработчиков, проводить их совместное тестирование, а также использовать наиболее подходящие модули для прикладных задач (робототехнические системы, медицинские симуляторы, и другие приложения). В другой рабочей группе предполагается большая ориентация как на разработку инструментальных средств для регистрации параметров функционального состояния живых систем и интегрированную обработку экспериментальных данных, связанных с исследованиями мозговых процессов, так и на создание универсальной платформы интерфейса «мозг;- компьютер», которая позволит управлять любым внешним устройством, будь то манипулятор, протез, инвалидная коляска или текстовый компьютерный интерфейс.
3. Для функционирования таких рабочих групп предложено использовать возможности нескольких, уже существующих сайтов: Российской ассоциации нейроинформатики (<http://www.niisi.ru/iont/ni/>); института математики им. С.Л. Соболева СО РАН, Новосибирск, (http://math.nsc.ru/AP/ScientificDiscovery/pages/Vityaev_rus.html); кроме того, платформа движения «Россия – 2045» может быть базой для поддержки информационного общения в таких рабочих группах (<http://www.2045.ru/>).
4. Участники конференции осознают необходимость добиваться финансовой поддержки проектов, связанных с разработками симуляторов живых систем. Предполагается обращение в различные Фонды, бизнес-структуры, или общественные движения, имеющие возможность организовать условия для финансирования проектов по тематике конференции.
5. Участники круглого стола, проводившегося в рамках конференции, считают необходимым поставить в известность Президента и Правительство РФ о стратегической важности для безопасности России работ по созданию технических интеллектуальных (когнитивных) систем и о необходимости государственной поддержки этого направления. Для достижения паритета в этих разработках представляется необходимым создание на территории РФ специализированного научного центра по исследованиям когнитивных процессов в живых системах, разработкам технических комплексов, обладающих когнитивными свойствами, искусственных органов биотехнических интерфейсов и гуманоидных систем, предусмотрев соответствующий уровень финансирования

Web site конференции: <http://www.nd-cogsci.iapras.ru/2011/>

Памяти
Леонида Павловича
Шильникова
17.12.1934 - 26.12.2011



26 декабря 2011 года после тяжелой болезни ушел из жизни профессор Нижегородского университета, руководитель отдела дифференциальных уравнений НИИ прикладной математики и кибернетики при ННГУ Леонид Павлович Шильников. Российская и мировая наука потеряли одного из талантливых математиков своего времени, семья лишилась заботливого мужа, отца и деда, ученики и последователи – своего Учителя, а многочисленные коллеги и сотрудники – интеллигентного, глубоко порядочного и внимательного друга. Это тяжелая и невозполнимая утрата для всех нас.

Леонид Павлович всю свою научную жизнь посвятил глубоким фундаментальным исследованиям многомерных как диссипативных, так и консервативных динамических систем. Им получен ряд приоритетных пионерских результатов в области теории странных аттракторов, нелокальных (гомоклинических) бифуркаций, а также в области исследований динамики интегрируемых и неинтегрируемых гамильтоновых систем с гомоклиническими траекториями. Леонид Павлович основал известную во всем мире научную школу по исследованию нелинейных динамических систем, которая развивает научное направление, созданное в начале 30-х годов академиком А.А. Андроновым. Под его руководством 15 учеников защитили кандидатские диссертации, а четверо из них стали докторами наук. На международной конференции, посвященной семидесятилетию Леонида Павловича (Нижний Новгород, январь 2005 г.), его сотрудники переплели в отдельную книгу авторефераты его учеников и назвали ее «Академия Шильникова». И это в полной мере соответствует действительности. Помимо непосредственных аспирантов и молодых ученых,

с которыми Леонид Павлович работал в своем отделе, реальное количество учеников и последователей Л.П. Шильникова намного больше. Как в России, так и за рубежом количество специалистов в области качественной теории дифференциальных уравнений, теории динамического хаоса и нелинейной динамики, использующих в своей работе результаты «Академии Шильникова», с начала 80-х годов прошлого века росло буквально по экспоненте! Если до этого времени работы Леонида Павловича и его учеников обсуждались в основном узким кругом специалистов в области математики, то в 1980-е годы ряд фундаментальных результатов Шильникова был осознан представителями формировавшейся в те времена новой науки – нелинейной динамики и теории динамического хаоса. Думаю, что именно в это время научная школа по динамическим системам, созданная Леонидом Павловичем, становилась международной. Подтверждением сказанному может служить ряд представительных международных научных конференций, на которых главным образом обсуждались результаты и возможные приложения теоретических работ «Академии Шильникова», которые проходили в период с 1981 года и позже.

Научные заслуги Л.П. Шильникова были по достоинству оценены научной общественностью: он избирается членом-корреспондентом РАЕН, ему присуждают премию Российской Академии наук им. А.М. Ляпунова, премию Национальной Академии наук Украины им. М.А. Лаврентьева. В начале 2000 годов Леониду Павловичу присваивается престижная премия Международного Научного фонда им. Александра фон Гумбольдта по математике. Л.П. Шильников был членом редакционных коллегий ряда отечественных и зарубежных научных журналов, входил в научные и программные комитеты многих престижных научных конференций как по математике, так и по теории колебаний и нелинейной динамике. Многие годы он совместно с А.Н. Шарковским организовывал прекрасные научные школы в Кацивели, которые для многих остались в памяти как уникальные научные собрания математиков и представителей физики, химии и биофизики. Среди ученых Германии, которые выдвигали кандидатуру Л.П. Шильникова на Гумбольдтовскую премию, был известный математик, профессор Технического университета Берлина Бернольд Фидлер. Это ему принадлежит яркое высказывание по поводу важности научных результатов Л.П. Шильникова: «Если вы возьмете книгу по теории динамических систем или нелинейной динамике и не увидите в числе первых ссылки на работы Шильникова – уверяю вас, в этой книге вы не найдете ничего интересного!». Эту фразу в равной степени можно отнести и к научным статьям по нелинейной динамике и теории динамических систем. Подавляющее число специалистов в этих областях знаний полностью разделяют мнение Б. Фидлера.

Мое знакомство с Леонидом Павловичем состоялось в августе 1981 года на Международной конференции по нелинейным колебаниям в Киеве. И с этого времени наши научные взаимосвязи, постепенно перешедшие в близкие дружественные отношения продолжались до последних дней. Хочу отметить, что несмотря на сложившиеся теплые отношения с Леонидом Павловичем и его женой Людмилой Ивановной меня никогда не покидало чувство, что я нахожусь рядом с необыкновенным человеком, которому открыты непознанные тайны мира математики. Поэтому наши деловые отношения никогда не выходили за рамки отношений между Учителем и учеником.

Работы Шильникова оказали во многом определяющее влияние на становление моего научного коллектива. Нам удалось понять, что эти работы составляют основной фундамент, теоретическую базу для нелинейной динамики и современной теории колебаний, на которую должны опираться экспериментальные и прикладные исследования. Мы ощутили необходимость понять и осмыслить многие важные теоретические результаты Л.П. Шильникова и его «Академии». Это оказалось чрезвычайно сложной задачей, с которой нам в определенной степени удалось справиться. Это было бы невозможно без участия и помощи как самого Леонида Павловича, так и его учеников. Отмечу, что наиболее способным дать упрощенную интерпретацию сложных математических теорем был и остается Валентин Афраймович, один из его учеников, а также Вадим Быков, который многое нам дал в плане повышения уровня компьютерного моделирования. В результате с помощью «Академии Шильникова» мы овладели знанием и пониманием таких проблем, как динамика нелинейных систем в окрестности равновесия типа «седло-фокус», процессы, сопровождающие разрушение петли сепаратрисы и возникновение спирального аттрактора Шильникова, бифуркационный механизм рождения аттрактора Лоренца, нелокальные бифуркации резонансных циклов на двумерном торе и возникновение тор-хаоса. Мы были одним из первых в мире коллективов, который принял концепцию Шильникова о квазиаттракторах и получил ряд результатов, подтверждающих ее важность и правильность. Можно перечислить еще многие результаты, полученные в «Академии Шильникова», которые были нами освоены и применены на практике при радиофизическом и численном моделировании динамики хаотических систем. Возникали и новые задачи, например, задача о синхронизации предельного цикла на двумерном торе. Мне казалось невероятным, что эта проблема не рассматривалась математиками. И я поехал в Нижний Новгород поговорить на эту тему с Леонидом Павловичем. Помню, он лежал в больнице после инфаркта, но чувствовал себя уже достаточно хорошо. Мы встретились в больничной палате, и Леонид Павлович сразу попросил изложить суть вопроса. Он очень удивился идейной простоте задачи, но уверенно сказал, что она действительно до сих пор в математике и теории колебаний не ставилась и, естественно, не решалась. Для меня это было чрезвычайно важным и придало уверенности. Мы решили эту задачу и опубликовали результаты в престижных научных журналах. Роль личности и научных работ Леонида Павловича и его научной школы в становлении и развитии нашего научного коллектива трудно переоценить. Думаю, что многие руководители могут сказать то же самое и в отношении своих научных коллективов.

В жизни Леонид Павлович был очень образованным, интеллигентным и обаятельным человеком с весьма непростым, но твердым характером. Он любил свой дом, семью, дачу; любил волжские просторы и речку Ветлугу, где многие дни и ночи он проводил на рыбалке. Любил ходить по грибы, наслаждаясь тишиной леса и отсутствием всего лишнего, повседневного. Ему была свойственна неторопливость, взвешенное и внимательное отношение ко всему происходящему. Леонид Павлович любил и хорошо знал историю государства российского, так как с большим интересом читал книги по истории России. Он увлекался портретной и пейзажной живописью, коллекционировал нравившихся ему художников. В каждый мой приезд Леонид Павлович с детской непосредственностью и гордостью показывал мне новые картины, приобретенные им накануне. Он просто очень любил жизнь и не

представлял себе ее без спокойного общения с природой. Этим можно объяснить его нежелание участвовать в научной гонке. Он не мог позволить себе впасть в зависимость от каких-то графиков, расписаний и т.д. и старался быть свободным в своем научном творчестве. Однажды, когда Леонид Павлович и Людмила Ивановна гостили на нашей даче на берегу Волги под Саратовом, мы показали ему наши волжские дали, бесконечное количество красивых островов и узких протоков, вместе с песчаными косами и лесными массивами. Он был неожиданно поражен увиденным и признался, что наша Волга намного красивее той, что вблизи его родного Нижнего Новгорода. В тот приезд мы с Леонидом Павловичем обсуждали проблему разрушения двумерных торов и механизмы рождения тор-хаоса. Помню, что именно тогда я решился спросить его, почему он с учениками до сих пор не написали книгу по теории нелокальных бифуркаций? Ведь очень трудно, не являясь профессиональным математиком, понимать ваши результаты, а потребность в этом уже давно назрела. Леонид Павлович ответил мне так: «Я не могу выделить не менее чем два года на эту работу. Придется отказаться на это время от написания научных статей, а этого я не могу себе позволить». Я очень рад, что спустя много лет Леонид Павлович совместно с сыном Андреем, своим учеником Дмитрием Тураевым и профессором Беркли Л. Чуа написали все-таки книгу по методам качественной теории в нелинейной динамике. Эта книга в двух томах опубликована на английском языке и переведена на русский издательством РХД в Ижевске.

Всю тяжесть постигшей нас утраты невозможно переоценить. Хочется выразить глубокие соболезнования жене Леонида Павловича Людмиле Ивановне, его детям Андрею и Марине, для которых кончина мужа и отца явилась настоящей трагедией. Выражаем искренние соболезнования всем ученикам и последователям дела Леонида Павловича, а также его многочисленным друзьям, коллегам и почитателям таланта во всем научном мире. Единственным утешением для нас может служить то, что результаты работ Л.П. Шильникова последних десяти лет еще ждут своего осмысления и понимания со стороны специалистов в области прикладной нелинейной динамики и будут положены в основу многих научных исследований в будущем.

10.01.2012

*В.С. Анищенко, заведующий кафедрой
радиофизики и нелинейной динамики
Саратовского государственного университета*